

# Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal

INFORME FINAL



Qda. Pedregal  
<http://pacivur.blogspot.com/>



# **Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal**

**INFORME FINAL**









## **DIRECTORIO**

PhD. Ken Takahashi Guevara  
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando  
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro  
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

## **REVISADO POR:**

PhD. Waldo Lavado Casimiro  
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas  
wlavado@senamhi.gob.pe

## **ELABORADO POR:**

MSc. Henry Joel Asencios Astorayme  
Especialista en hidrología e hidráulica

## **PERSONAL DE APOYO:**

Ing. Carlos Millán Arancibia	Especialista en Hidrología
Ing. Evelin Sabino Rojas	Analista de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
Ing. Juan Carlos Breña Aliaga	Especialista en Hidrología

Lima-Perú

Mayo - 2020

#### **CITAR COMO:**

Asencios, H.; Millán C, Rojas E.; Breña J.C. (2020). Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en las quebrada Pedregal -Informe Final. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. Dirección de hidrología -DHI. Mayo 2020.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>2</b>
2.1	General .....	2
2.2	Específicos .....	2
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA Y TEMÁTICA.....</b>	<b>3</b>
3.1	Descripción general de la cuenca .....	3
3.1.1	Ubicación geográfica del área de estudio.....	3
3.1.2	El factor topográfico en la producción de sedimentos .....	3
3.1.3	Geoformas .....	10
3.1.4	Mecánica de suelos .....	13
3.1.5	Uso y cobertura del suelo.....	15
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS .....</b>	<b>17</b>
4.1	Precipitación máxima diaria.....	17
4.2	Análisis de frecuencias.....	19
4.3	Desarrollo de curvas IDF .....	22
4.4	Tormenta de diseño .....	24
<b>5</b>	<b>SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA.....</b>	<b>25</b>
5.1	Resultados .....	29
<b>6</b>	<b>SIMULACIÓN DEL TRÁNSITO DE FLUJOS DE ESCOMBROS .....</b>	<b>31</b>
6.1	Modelo reológico.....	35
6.2	Resultados .....	36
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>40</b>
9.1	Perfil estratigráfico de las calicatas .....	40
9.2	Resultados de laboratorio.....	45
9.3	Panel fotográfico.....	53

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ubicación de la quebrada Pedregal que drena hacia el río Rímac en la localidad de Chosica..	4
<b>Figura 2.</b> Modelo digital de superficie de la quebrada Pedregal que drenan hacia el río Rímac en la localidad de Chosica. ....	5
<b>Figura 3.</b> Curva hipsométrica de la quebrada Pedregal.....	6
<b>Figura 4.</b> A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Pedregal; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal.....	6
<b>Figura 5.</b> Distribución espacial de la pendiente (%) de la quebrada Pedregal.....	7
<b>Figura 6.</b> Distribución espacial del índice de poder erosivo de la quebrada Pedregal. ....	8
<b>Figura 7.</b> Distribución espacial del índice de transporte de sedimentos de la quebrada Pedregal... ..	9
<b>Figura 8.</b> Representación visual del depósito aluvial (izquierda), coluvial (centro) y espesor de sedimentos en el cauce principal (derecha) encontrado en la quebrada el Pedregal.....	10
<b>Figura 9.</b> Distribución espacial de geoformas en la quebrada Pedregal, en la localidad de Chosica... ..	11
<b>Figura 10.</b> Mapa geológico de la quebrada Pedregal, en la localidad de Chosica.. ....	12
<b>Figura 11.</b> Ubicación de calicatas aperturadas realizadas para caracterizar las propiedades mecánicas de suelos en la quebrada Pedregal.....	14
<b>Figura 12.</b> Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en la quebrada el Pedregal.....	16
<b>Figura 13.</b> Serie de tiempo de la precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica. ....	17
<b>Figura 14.</b> Frecuencia relativa y acumulada de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica. ....	18
<b>Figura 15.</b> Autocorrelograma parcial de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica. ....	18
<b>Figura 16.</b> Distribuciones probabilísticas teóricas de ajuste de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.....	21
<b>Figura 17.</b> Relación periodo de retorno versus magnitud de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.....	21
<b>Figura 18.</b> Curvas IDF de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.....	24



<b>Figura 19.</b> Perfiles de tormenta de 6 horas de duración tipo SCS-II y Curvas Huff (segundo curtil) usados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía. ....	25
<b>Figura 20.</b> Esquema conceptual del modelo TREX. ....	26
<b>Figura 21.</b> Representación topológica de la quebrada Pedregal (NODE). ....	27
<b>Figura 22.</b> Representación topológica de la quebrada Pedregal (LINK). ....	28
<b>Figura 23.</b> Resultados de la simulación del proceso de precipitación escorrentía usando el modelo TREX para la quebrada Pedregal. ....	30
<b>Figura 24.</b> Hidrograma de avenida para un periodo de retorno de 100 años y distintos perfiles de tormenta de la quebrada Pedregal usando el modelo TREX. ....	31
<b>Figura 25.</b> Profundidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración. ....	33
<b>Figura 26.</b> Velocidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración. ....	34
<b>Figura 27.</b> Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros para la quebrada Pedregal ....	36
<b>Figura 28.</b> Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal. ....	40
<b>Figura 29.</b> Perfil estratigráfico de la calicata #2 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal. ....	41
<b>Figura 30.</b> Perfil estratigráfico de la calicata #3 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal. ....	42
<b>Figura 31.</b> Perfil estratigráfico de la calicata #4 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal. ....	43
<b>Figura 32.</b> PPerfil estratigráfico de la calicata #5 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal. ....	44
<b>Figura 33.</b> Resultados del ensayo de corte directo (gráfico) para el punto 1 (QP-1) de la quebrada Pedregal. ....	45
<b>Figura 34.</b> PResultados del ensayo de corte directo (tabular) para el punto 1 (QP-1) de la quebrada Pedregal. ....	46
<b>Figura 35.</b> Resultados del ensayo de granulometría para el punto 2 (QP-2) de la quebrada Pedregal. ....	47
<b>Figura 36.</b> Resultados del ensayo de granulometría para el punto 3 (QP-3) de la quebrada Pedregal. ....	48

<b>Figura 37.</b> Resultados del ensayo de granulometría para el punto 4 (QP-4) de la quebrada Pedregal..	49
<b>Figura 38.</b> Resultados del ensayo de granulometría para el punto 5 (QP-5) de la quebrada Pedregal..	50
<b>Figura 39.</b> Resultados del ensayo de permeabilidad para el punto 5 (QP-5) de la quebrada Pedregal.	51
<b>Figura 40.</b> Resultados del ensayo de determinación de peso específico para el punto 5 (QP-5) de la quebrada Pedregal.	52
<b>Figura 41.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Puntos de interés con registro fotográfico.	53
<b>Figura 42.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos..	53
<b>Figura 43.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P1.	54
<b>Figura 44.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P2.	54
<b>Figura 45.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P3.	55
<b>Figura 46.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P4.	55
<b>Figura 47.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P5.	56
<b>Figura 48.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Vista aguas abajo.	56
<b>Figura 49.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Presas y geomalla para el control de sedimentos..	57
<b>Figura 50.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Geomalla para el control de sedimentos.	57
<b>Figura 51.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Deposito aluvial.	58
<b>Figura 52.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos en el cauce.	58
<b>Figura 53.</b> Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos en el cauce.	59

**Figura 54.** Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos en el cauce .....59

**Figura 55.** Microcuenca el Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Huella del paso de una onda de flujo de escombros (~4m) en una geomalla...60

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parámetros morfológicos de la quebrada el Pedregal .....	3
<b>Tabla 2.</b> Parámetros morfológicos de la quebrada Pedregal .....	15
<b>Tabla 3.</b> precipitación máxima en 24 horas registrada en la estación Chosica.....	17
<b>Tabla 4.</b> Índices estadísticos para establecer la estacionariedad de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.....	19
<b>Tabla 5.</b> Índices estadísticos de ajuste de las distribuciones teóricas de probabilidad. ....	20
<b>Tabla 6.</b> Magnitud de la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno..	20
<b>Tabla 7.</b> Valores de los parámetros de la relación IDF para la estación Chosica.....	23
<b>Tabla 8.</b> Parámetros para caracterizar el proceso de infiltración del agua en el suelo.....	29
<b>Tabla 9.</b> Parámetros para caracterizar la rugosidad superficial e intercepción de la lluvia. ....	29
<b>Tabla 10.</b> Parámetros usados en el modelo reológico para la simulación con Flo2D.....	35
<b>Tabla 11.</b> Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros. ....	36
<b>Tabla 12.</b> Relación entre el número de Manning (n) y la simulación del flujo de escombros .....	37



## PRESENTACIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú-SENAMHI en el marco de la Red Nacional de Alerta Temprana (RNAT) correspondiente al Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD), conduce el Subcomité de Peligros Hidrometeorológicos que en coordinación con el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) viene desarrollando propuestas e instrumentos que permiten la implementación y operación de Sistemas de Alerta Temprana ante los peligros relacionados a las competencias oficiales del SENAMHI. En tal contexto, que ha permitido el desarrollo del “Protocolo para la emisión de avisos, alertas y alarmas ante lluvias intensas y peligros asociados” (aprobado mediante R. M. N° 049-2020-PCM), se ha dispuesto la implementación del Sistema de Alerta Temprana en la Cuenca del Río Rímac ante Lluvias Intensas y Peligros Asociados, que incluye inundaciones y activación de quebradas (SAT-RIMAC).

Dado este marco, el Senamhi ha firmado convenios específicos con diferentes municipalidades y otros actores en el ámbito de la cuenca del río Rímac a fin de realizar estudios especializados para la caracterización de los peligros hidrometeorológicos que contribuirán a la Gestión del Riesgo de Desastres a nivel local.

El presente estudio denominado “Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal”, ha sido realizado en el marco del Convenio de Cooperación Técnica firmado entre el SENAMHI y la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle.

El presente estudio denominado “Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal”, ha sido realizado bajo el Convenio de Cooperación Técnica suscrito entre el SENAMHI y la Municipalidad distrital de Lurigancho.

El estudio, que fue dirigido por la Dirección de Hidrología del Senamhi, aporta información de línea base sobre: la geomorfología y geología de la quebrada; la caracterización de los caudales líquidos y sólidos del flujo de detritos; la simulación numérica de la dinámica del flujo de agua y sedimentos así mismo la estimación de las potenciales zonas de afectación por flujo de detritos, para lo cual se ha considerado diferentes umbrales de lluvias y caudales extremos. Dicha información es relevante para la Vigilancia de las lluvias intensas así como para el diseño de las obras civiles de control de flujos de escombros.



## INFORME FINAL

### **Caracterización del peligro por movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal**

## **1 INTRODUCCIÓN**

El SENAMHI tiene dentro de sus funciones y competencias, a través de la Dirección de Hidrología, la vigilancia y el pronóstico hidrológico operacional. Una actividad corresponde al monitoreo de movimientos en masa por lluvias extremas en diferentes cuencas del territorio nacional. Este trabajo se realiza con la finalidad de proveer información confiable y oportuna para la alerta de eventos extremos y sus potenciales zonas de afectación.

Es en ese contexto que surge la necesidad de aumentar el conocimiento acerca de la ocurrencia del fenómeno de movimientos en masa desencadenado por lluvias extremas, a través de la caracterización de los diversos procesos físicos involucrados en la quebrada Pedregal en la localidad de Chosica, Lima.

La falla de taludes, la erosión superficial y el flujo de escombros son riesgos geográficos típicos inducidos por las lluvias extremas en las zonas montañosas, y pueden representar un alto riesgo para la sociedad. A menudo son provocados por precipitaciones extremas y son muy sensibles a la variabilidad y el cambio climático (Lee et al., 2010).

A medida que las tormentas extremas se hacen más frecuentes, el manejo de los riesgos geológicos se vuelve crítico, tal como quedó evidenciado en el último fenómeno El Niño Costero 2017 en las quebradas que drenan a la ciudad de Chosica. Por lo tanto, es necesario desarrollar métodos apropiados para el análisis integrado de riesgos geológicos a escala regional a fin de hacer frente peligro inducido por las lluvias extremas.

El flujo de escombros es un peligro geológico catastrófico en las regiones montañosas como la localidad de Chosica. Por lo tanto, la evaluación del riesgo del flujo de detritos es muy importante para poder mitigar los efectos negativos de este tipo de fenómenos.

El análisis del peligro es la base de la evaluación del riesgo del flujo de detritos. Los procesos de erosión, transporte y deposición de un flujo de escombros se han estudiado en el pasado (Takahashi, 1981, 2014; Iverson y Ouyang, 2015). Algunos investigadores también han tenido en cuenta la variabilidad espacial de las propiedades mecánicas de los depósitos de sedimentos de las zonas afectadas por el flujo de escombros (Chen y Zhang, 2015).

Sin embargo, el proceso físico de iniciación del flujo de detritos no se considera de forma explícita en los métodos de modelización existentes. En su lugar, se requiere un hidrograma predefinido, creado sobre la base de los volúmenes estimados de escorrentía y de la fuente de sedimentos, para iniciar un análisis del flujo de escombros.

Esto lleva a grandes incertidumbres en la localización, tiempos y volúmenes de iniciación del flujo de escombros cuando se aplica al análisis regional de la ocurrencia de este tipo de eventos. Hasta la actualidad, se ha intentado de forma muy limitada simular, de forma integrada, todo el proceso, desde el inicio hasta el movimiento y deposición del flujo de escombros. Dado que el flujo de escombros implica una escala regional, se debería implementar un modelo integrado para simular todo el proceso de transporte de sedimentos desde el inicio hasta la deposición.

La interacción de peligros múltiples y el efecto en cascada son otra preocupación cuando ocurren eventos meteorológicos extremos. Diversos tipos de peligros pueden ser inducidos por una tormenta. Por ejemplo, fallas de taludes, erosión superficial y flujos de escombros (Zhang y Zhang, 2017).

Un peligro puede ser la causa de otro. Dicho de otra forma, las lluvias podrían desencadenar fallas en los taludes que a su vez generaría flujo de escombros. Diferentes tipos de peligros también pueden interactuar entre sí y amplificarse entre ellos. La interacción y el efecto en cascada de los peligros múltiples pueden intensificar la magnitud y el área de impacto de cada uno de ellos.

La simulación de los procesos completos de posibles amenazas y sus interacciones a escala regional puede ser una herramienta poderosa para ayudar a identificar las amenazas probables, sus áreas de impacto potencial y los elementos en riesgo.

Se han desarrollado algunos modelos numéricos para simular el movimiento del flujo de detritos teniendo en cuenta la erosión superficial (O'Brien et al., 1993; Chen y Zhang, 2015; Quan Luna et al., 2016).

Sin embargo, a menudo la falla de taludes es simulada por separado, y no se considera la modelización física del transporte del material desprendido ni el proceso de erosión superficial. Existen muy pocas investigaciones que intentan incorporar múltiples amenazas inducidas por la lluvia para analizar las interacciones entre amenazas. Por lo tanto, el desarrollo de un modelo integrado para simular procesos e interacciones de peligros múltiples es de gran importancia teórica y práctica.

Las fallas en los taludes y los flujos de escombros se encuentran entre los riesgos geográficos más frecuentes y perjudiciales inducidos por las lluvias extremas bajo las circunstancias de la variabilidad y cambio climático y representan una amenaza para la vida y la propiedad, directa o indirectamente.

Es sumamente importante anticipar y mitigar los riesgos potenciales a largo plazo asociados con futuros eventos extremos. Existen muchos métodos para mitigar el riesgo de peligros geológicos, tales como medidas de ingeniería y soluciones basadas en la naturaleza. Entre ellas, la vegetación es una forma natural y respetuosa con el medio ambiente. Otra alternativa que ha mostrado una atenuación importante en los efectos negativos corresponde a las geomallas. En todo caso, aumentar el conocimiento de cada uno de los peligros geológicos desencadenados por lluvias extremas y su interrelación es de suma importancia para una eficiente gestión de riesgo de desastres.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 General**

Caracterizar las variables físicas que describen el fenómeno de movimientos en masa debido a lluvias extremas en la quebrada Pedregal.

### **2.2 Específicos**

- i. Realizar la caracterización geomorfológica-geológica y describir los procesos de geodinámica externa de la microcuenca de estudio.
- ii. Estimar los hidrogramas líquidos y sólidos producto de la ocurrencia de tormentas de diseño asociadas a diferentes periodos de retorno: 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.
- iii. Estimar la dinámica del flujo de agua y sedimentos asociada a la ocurrencia de las tormentas de diseño preestablecidas.



### 3 DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA Y TEMÁTICA

#### 3.1 Descripción general de la cuenca

##### 3.1.1 Ubicación geográfica del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte media de la cuenca del río Rímac. Comprende un afluente denominado quebrada Pedregal que drenan hacia el río Rímac, tal como se puede observar en la Figura 1.

La quebrada Pedregal, hasta el punto de interés (desembocadura en el río Rímac), presenta un área de drenaje de 10,3 Km<sup>2</sup>, un perímetro de 18,5 Km y una diferencia altitudinal o energía potencial de 1504,3 m, según se puede observar en la Tabla 1 y Figura 1.

**Tabla 1. Parámetros morfológicos de la quebrada Pedregal.**

Parámetros generales			Parámetros de forma			Parámetros de Relieve			Índice hipsométrico	
A (Km <sup>2</sup> )	P (Km)	DA (m)	Cg	Lre (Km)	Ire (Km)	L (Km)	j (%)	J (%)	Altitudinal (IHA)	Areal (IHa)
10,28	18,53	1504,31	1,63	8,06	1,28	5,66	14,74	50,35	0,86	0,47

Fuente: Elaboración propia

Para obtener los parámetros morfológicos y diferentes productos topográficos se ha usado el Modelo Digital de Superficie (DSM) que se muestra en la Figura 2. Mayor información del producto global (ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30)") se puede encontrar en <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>.

Respecto de sus parámetros de forma, la quebrada Pedregal presenta un índice de Gravelius de 1,6 y longitudes del rectángulo equivalente de 8,1 y 1,3 Km (lado mayor y menor). Estos valores sugieren que nos encontramos en presencia de una cuenca semi-alargada en donde se espera que la respuesta hidrológica no sea inmediata.

En cuanto a los parámetros de relieve, se ha encontrado que la longitud del cauce principal es de 5,7 Km, una pendiente media de 14,8%, y una pendiente media de ladera de 50,4%. Estas características corresponden a un río de montaña o pie de monte en donde probablemente se presente una gran capacidad de transporte de sedimentos en épocas de avenidas, y la respuesta hidrológica sea inmediata (ver Tabla 1 y Figura 3 y 4).

Considerando la curva hipsométrica de la cuenca, que representa el área drenaje con relación a su altitud (Figura 3), se ha encontrado que más del 80% del área de drenaje se encuentra por encima de los 1198,5 msnm. Asimismo, se ha determinado que el índice hipsométrico altitudinal (areal) es de 0,87 (0,47), lo cual nos permite sugerir que nos encontramos frente una cuenca del tipo erosiva, con una red de drenaje sometida a fuertes tensiones de corte, en donde probablemente se presente una alta capacidad de carga, principalmente en épocas de avenidas. Asimismo, esta subcuenca podría estar caracterizada por procesos geomorfológicos de erosión en ladera y cárcavas, así como erosión en el cauce y bancos.

##### 3.1.2 El factor topográfico en la producción de sedimentos

Tal como se puede observar en la Figura 5, la quebrada en estudio presenta una alta variabilidad espacial de pendientes tanto en ladera como en la red de drenaje. Se resalta una predominancia de bajas pendientes cerca del cono aluvial, donde se encuentra asentada la población, y donde probablemente se depositen los sedimentos generados en las quebradas.



**Leyenda**

— Red de drenaje

□ Cuenca

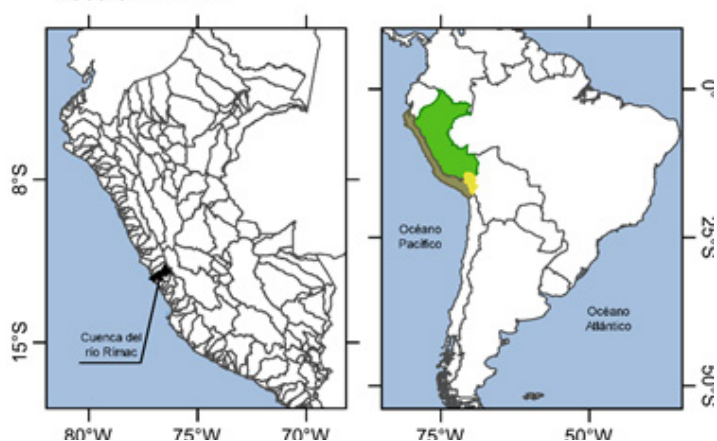


Figura 1. Ubicación de la quebrada Pedregal que drenan hacia el río Rímac en la localidad de Chosica.

Fuente: Elaboración propia



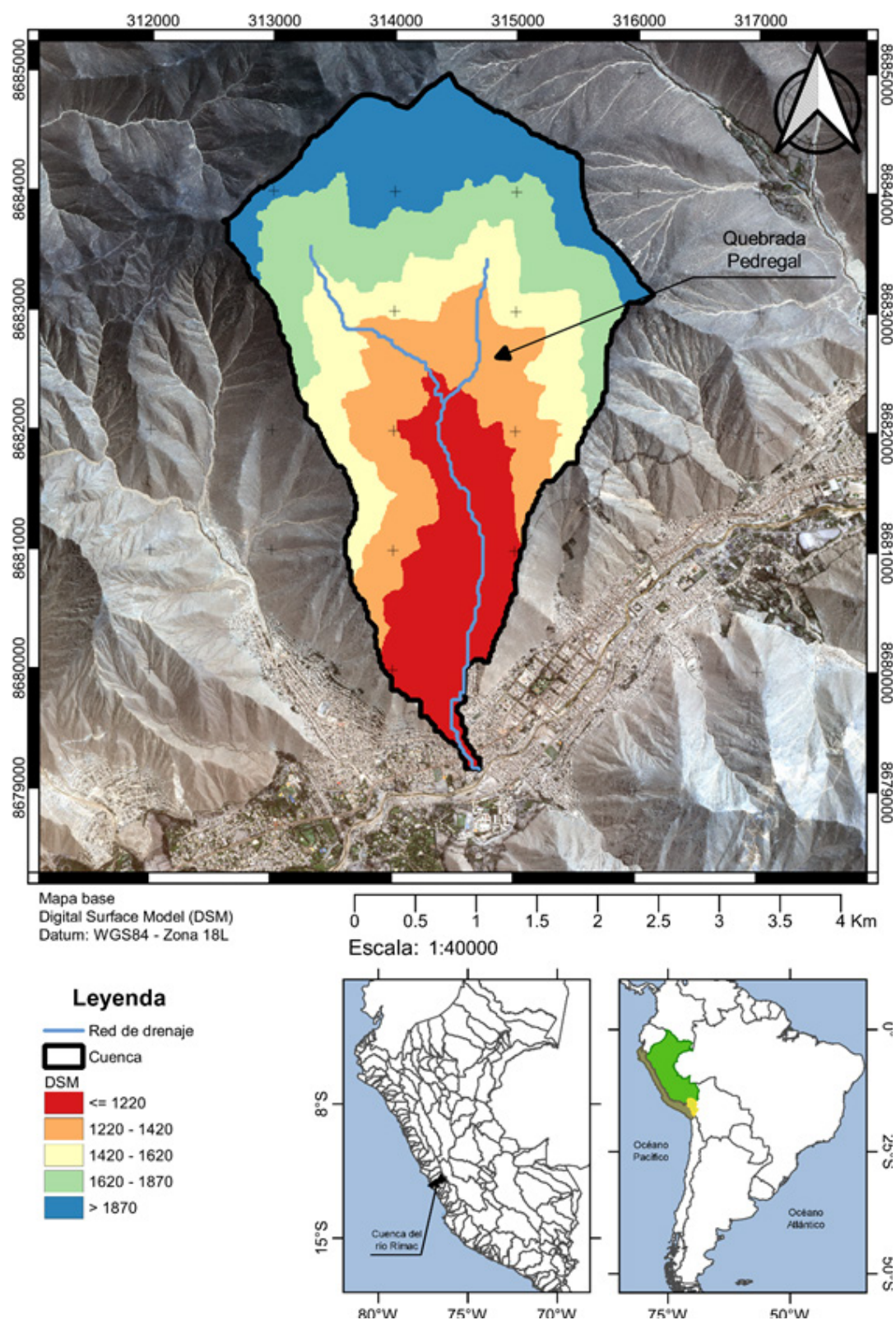


Figura 2. Modelo digital de superficie de la quebrada Pedregal que drenan hacia el río Rimac en la localidad de Chosica

Fuente: Elaboración propia

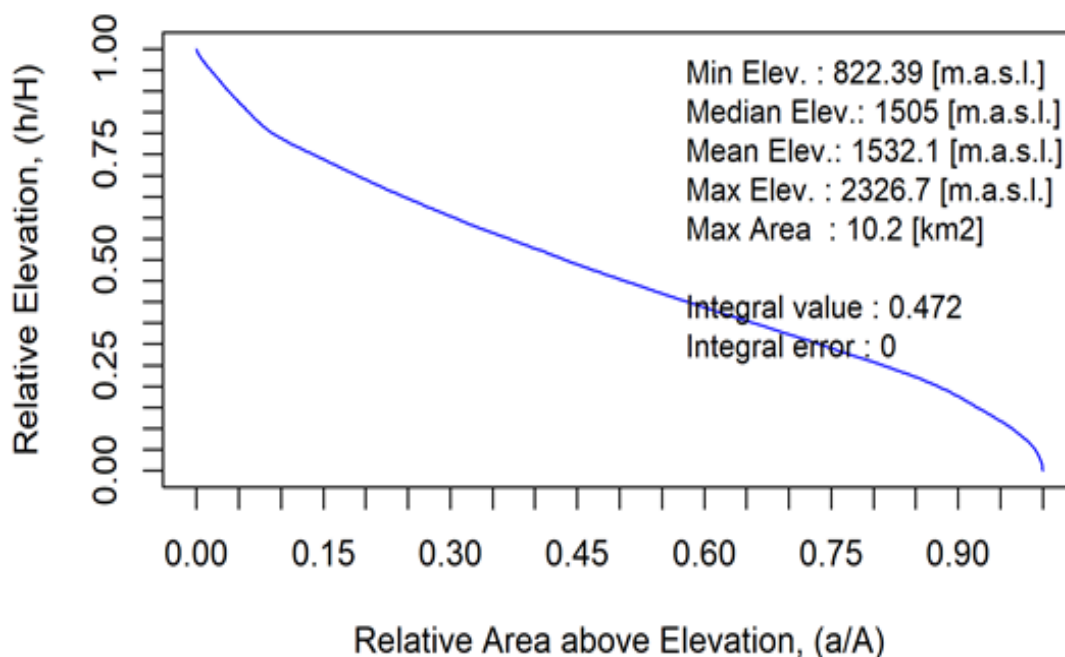


Figura 3. Curva hipsométrica de la quebrada Pedregal.

Fuente: Elaboración propia

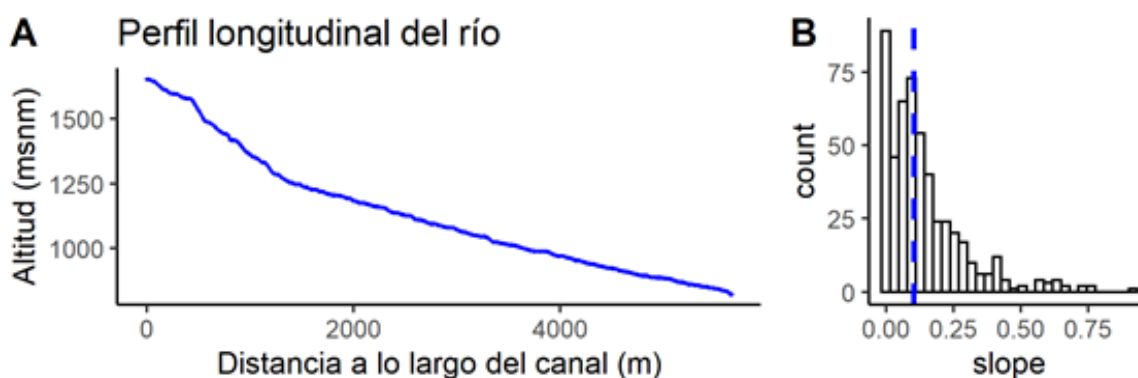


Figura 4. A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Pedregal; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal.

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la pendiente longitudinal del cauce principal y su distribución de frecuencias (Figura 4), nos permite sugerir que nos encontramos frente a quebradas jóvenes en donde no se ha alcanzado un equilibrio geomorfológico y que probablemente, cuando ocurran eventos hidrometeorológicos extremos, se produzca una importante producción de sedimentos.

Del mismo modo, es razonable pensar que la red de drenaje contenga elementos macrorugosos de gran tamaño y una granulometría mal graduada. Esto con la finalidad de compensar la alta energía generada cuando ocurre el flujo de agua y sedimentos debido a lluvias extremas.

Si observamos la red de drenaje, representada en el mapa base de la Figura 1, se podría afirmar que uno de los procesos más importantes para la producción de sedimentos en la quebrada es la erosión en cárcavas. Lo anterior se reafirma si observamos las Figuras 6 y 7; es decir, la distribución espacial del índice de poder erosivo del flujo y transporte de sedimentos, respectivamente.



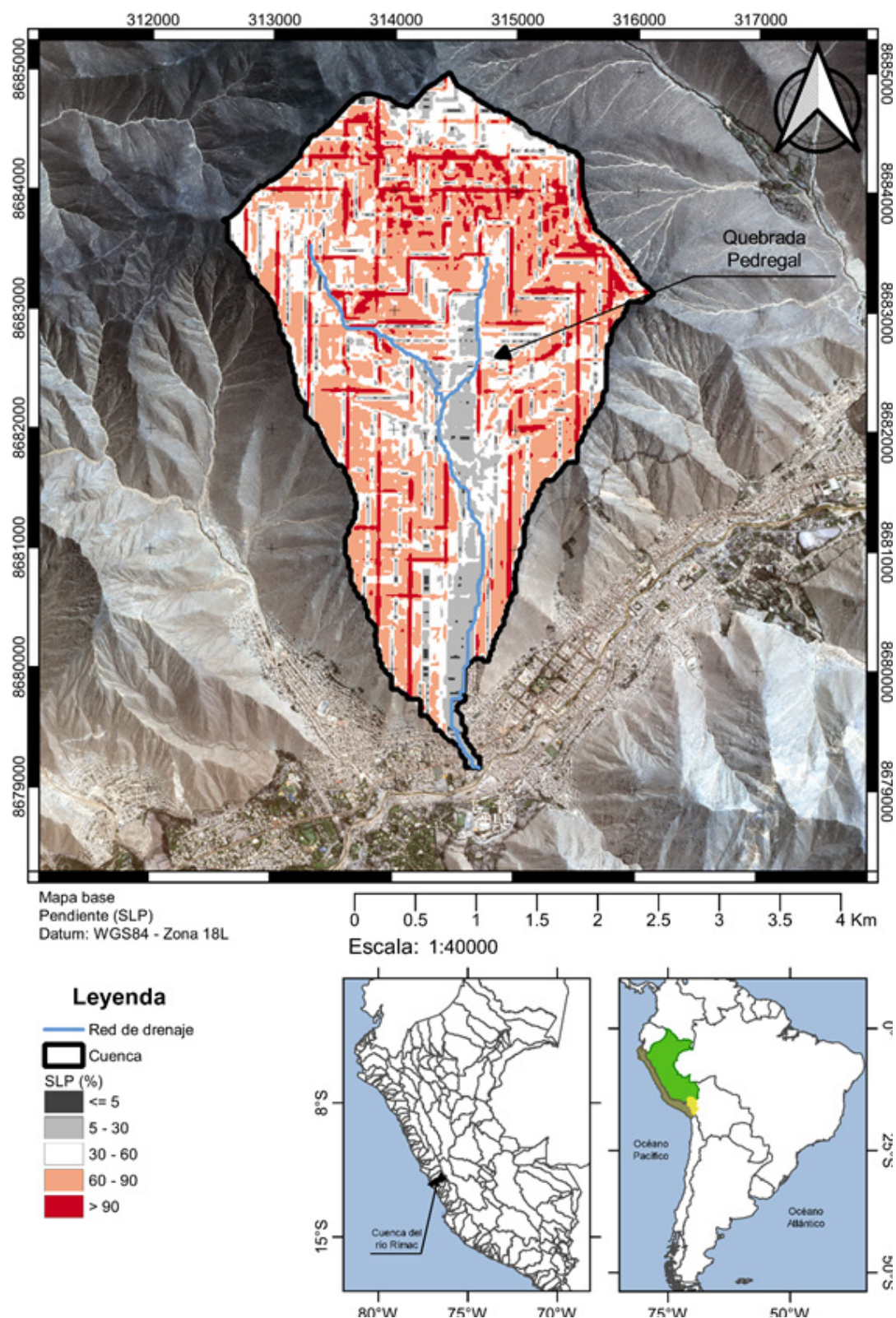


Figura 5. Distribución espacial de la pendiente (%) de la quebrada Pedregal.  
Fuente: Elaboración propia



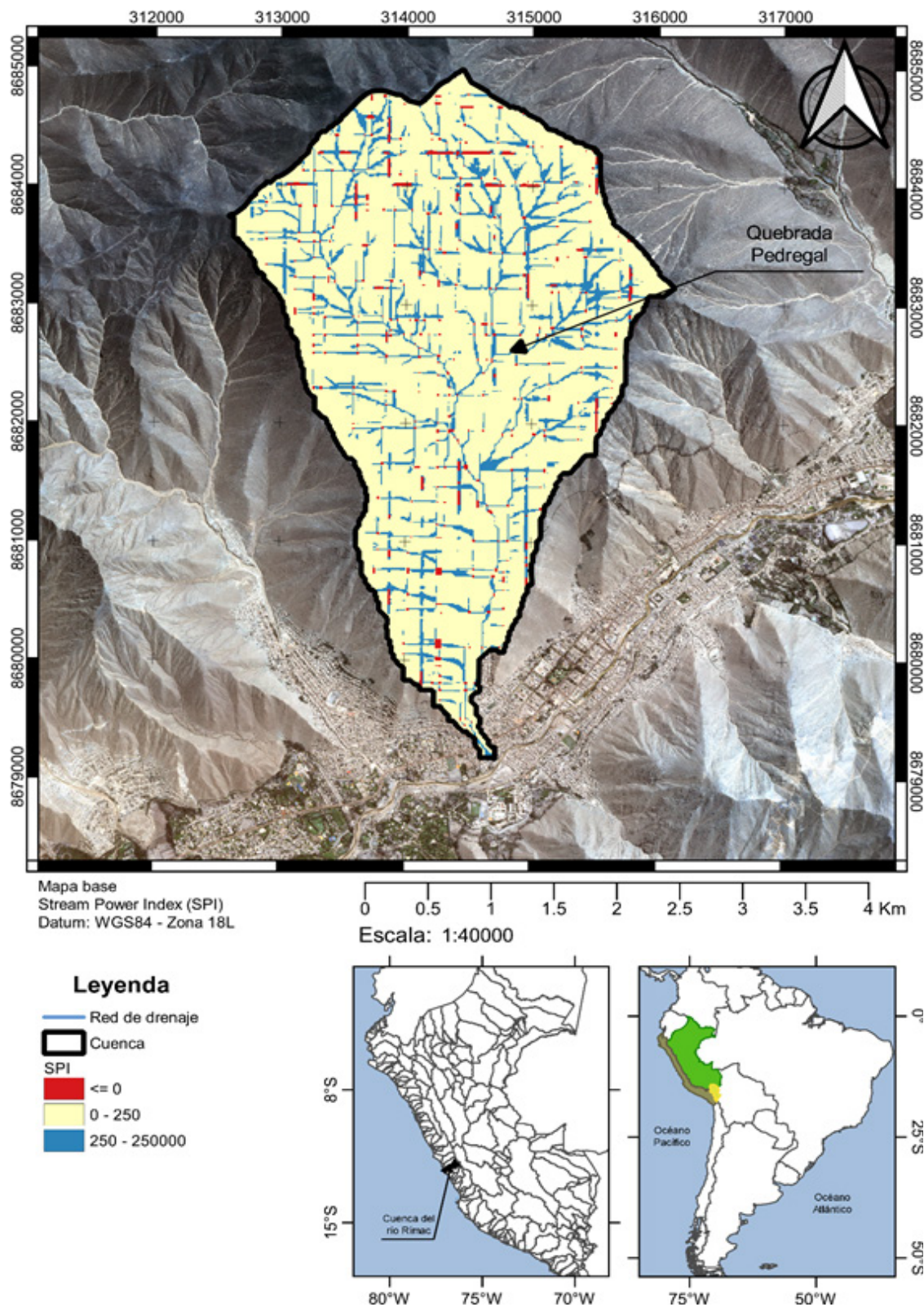


Figura 6. A) perfil longitudinal del tramo principal de la quebrada Cantuta; y B) Histograma de frecuencia de la pendiente longitudinal

Fuente: Elaboración propia



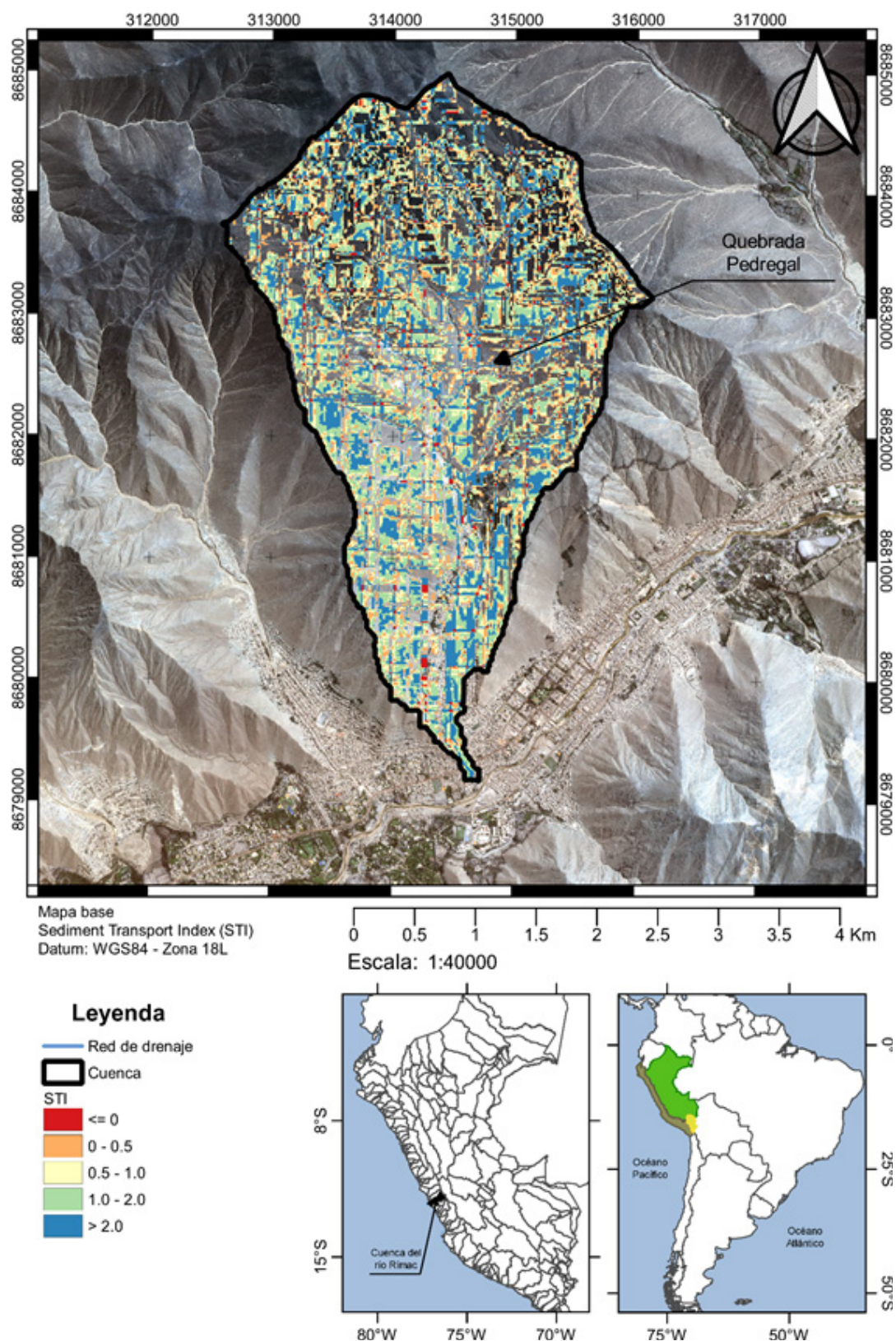


Figura 7. Distribución espacial del índice de transporte de sedimentos de la quebrada Pedregal.

Fuente: Elaboración propia

Según la Figura 6, se confirma que cuando se activan las quebradas por lluvias extremas, el factor topográfico juega un papel predominante, generando que uno de los principales modos de producción de sedimentos sea la erosión en cárcavas (ver la clase de color azul en el mapa). Es decir, de existir depósitos sedimentarios disponibles en las quebradas, la acción del agua —a través de la escorrentía superficial— generaría que la configuración espacial de las quebradas sea como se muestra en el referido mapa.

Lo anterior está limitado a la disponibilidad espacial y tamaño de los sedimentos en la cuenca, así como la exposición del basamento rocoso.

De acuerdo al patrón espacial del índice de transporte de sedimentos, mostrado en la Figura 7, se puede sugerir que otro mecanismo importante para la producción de sedimentos en las quebradas en estudio corresponde a la erosión superficial. Es decir, provocado por la acción del flujo de agua sobre la ladera.

Finalmente, otro mecanismo importante corresponde a la erosión fluvial y bancos en el sistema fluvial.

### 3.1.3 Geoformas

Para caracterizar las geoformas se ha usado el producto Global ALOS Landforms ([https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CSP\\_ERGo\\_1\\_0\\_Global\\_ALOS\\_landforms](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/CSP_ERGo_1_0_Global_ALOS_landforms)) que está basado en el producto que corresponde al DSM usado en la presente consultoría.

Según se puede observar en las Figuras 8 y 9, se ha encontrado 5 clases de geoformas: valle, pendientes bajas, pendientes altas, picos y divisorias.



*Figura 8. Representación visual del depósito aluvial (izquierda), coluvial (centro) y espesor de sedimentos en el cauce principal (derecha) encontrado en la quebrada Pedregal.*

*Fuente: Elaboración propia*



Cada geoforma corresponde a una unidad simple y característica del terreno que forma parte de la superficie terrestre. Es importante resaltar la importancia de este factor debido a que representa la evolución del paisaje debido a los agentes físicos como la acción del agua sobre la superficie a escala local.

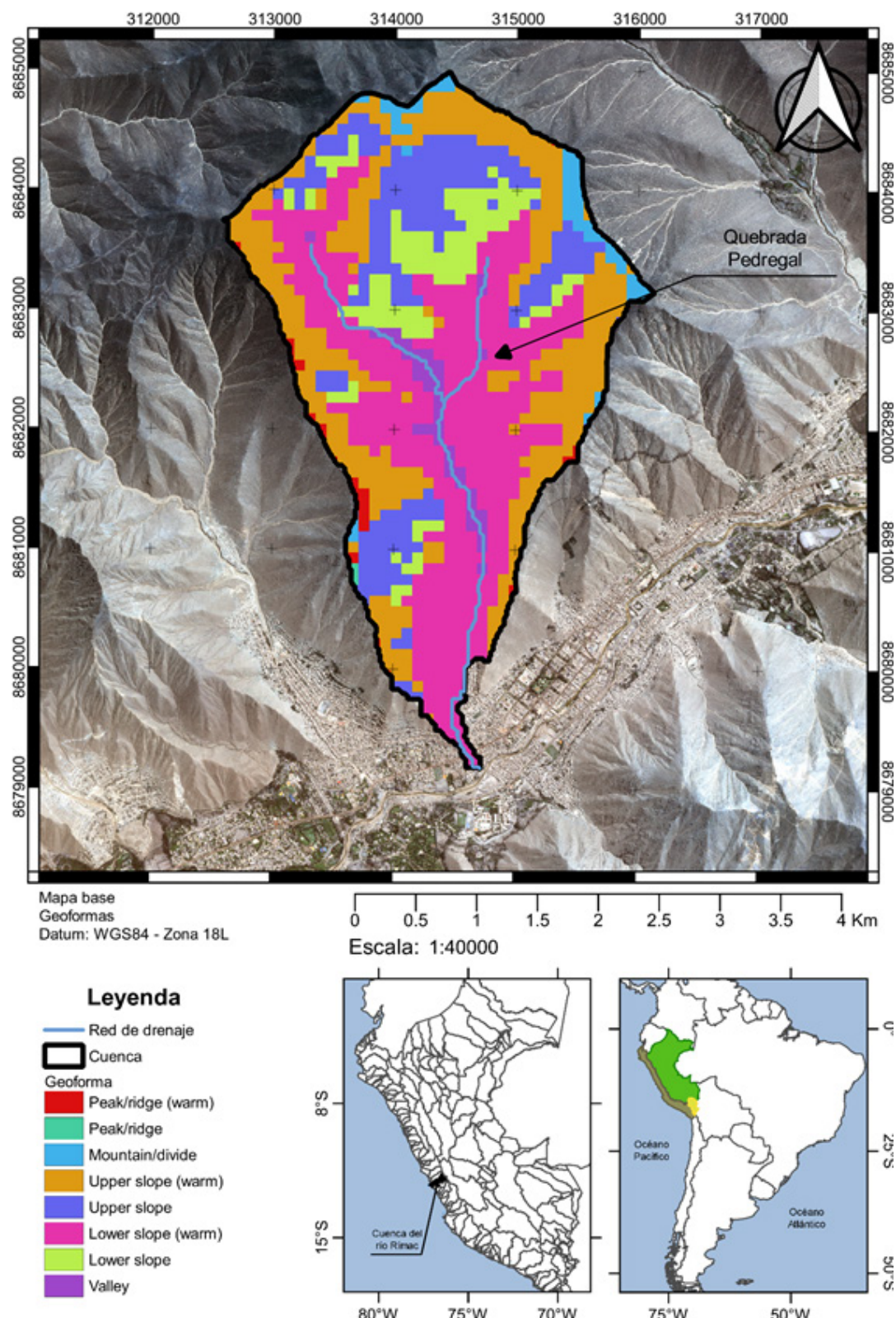


Figura 9. Distribución espacial de geoformas en la quebrada Pedregal, en la localidad de Chosica.

Fuente: Elaboración propia

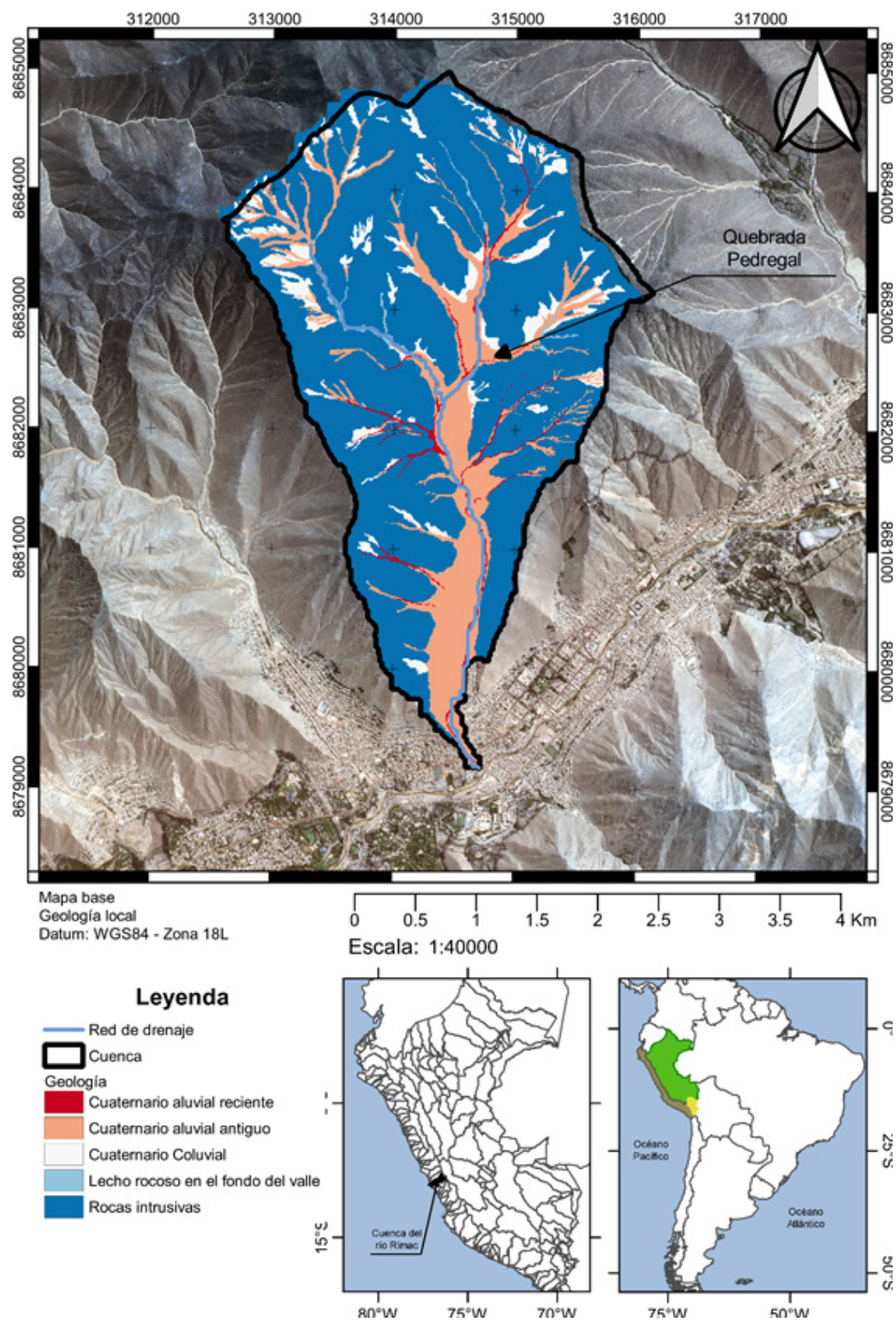


Figura 10. Mapa geológico de la quebrada Pedregal, en la localidad de Chosica.

Fuente: Elaboración propia



En específico, el valle y las zonas de pendientes bajas (terrazas y conos aluviales) están constituidos por un depósito sedimentario aluvial reciente y antiguo que presentan arenas limosas y grava de diferente tamaño y pueden alcanzar un espesor entre 0,5 a 1,0 m (Figura 10). Se puede considerar como una de las fuentes más importantes de sedimentos en las quebradas en estudio.

Según se puede observar en la Figura 10, las demás geoformas (zonas de alta pendiente, divisoria y picos) están constituidas por un depósito sedimentario coluvial y eluvial (roca intrusiva meteorizada). Se encuentra en laderas recubriendo el macizo rocoso y podrían tener un espesor aproximado de 0,3 a 0,5 m.

#### 3.1.4 Mecánica de suelos

Como se puede observar en la Figura 11, se han realizado cuatro (05) calicatas aperturadas en las quebradas Pedregal. Todas ellas en el depósito sedimentario aluvial que corresponde a la principal fuente de sedimentos.

En la Tabla 2 se puede observar el resumen de todos los ensayos de laboratorio realizados. Se resalta que en todos los casos la profundidad máxima alcanzada fue de 1,2 m y que la matriz de sedimentos está constituida preferentemente por arenas. Asimismo, en general, el porcentaje de finos (limos) es menor a 6%, que está estrechamente relacionado con la nula cohesión entre partículas en los depósitos sedimentarios analizados. Sin embargo, en la muestra QP-5, que pertenece a una terraza ubicada en la zona margen derecha del inicio del cauce principal, se ha encontrado un porcentaje de finos de 20%, que refuerza la idea de que la principal fuente de sedimentos se encuentra ubicada en las terrazas adyacentes al sistema fluvial (con mayor impacto sobre la reología de la mezcla de agua-sedimentos), asimismo que la erosión superficial representa gran parte de la producción de sedimentos.

Se ha encontrado la presencia de guijarros y cantos subredondeado en el conglomerado de matriz de arenas en la red de drenaje. Asimismo, se ha evidenciado de forma visual (en el reconocimiento de campo) la presencia de cemento superficial que modifica las propiedades físicas de la superficie como la infiltración del agua en el suelo. Probablemente nos encontremos frente a la presencia de carbonatos. Para asegurar lo anterior, se debería de realizar ensayos de mineralogía de las rocas sedimentarias de las quebradas en análisis.

Esta afirmación tiene incidencia directa sobre el proceso de precipitación-escorrentía de las quebradas en análisis, debido a que a pesar de haber obtenido una alta permeabilidad que corresponde a la matriz de arenas, se debe considerar una muy baja o nula infiltración para poder representar adecuadamente los efectos de la presencia de cementos sobre la precipitación efectiva que produce el escurrimiento superficial y el proceso erosión.

Además, se debe mencionar que la presencia de cemento tiene influencia sobre la resistencia de la superficie del terreno a la erosión (salpicadura, laminar y surcos). Esto no se podrá comprobar en esta consultoría porque corresponde a un proyecto de investigación aplicada. Sin embargo, se van a elegir valores de erodabilidad apropiados para considerar este efecto.

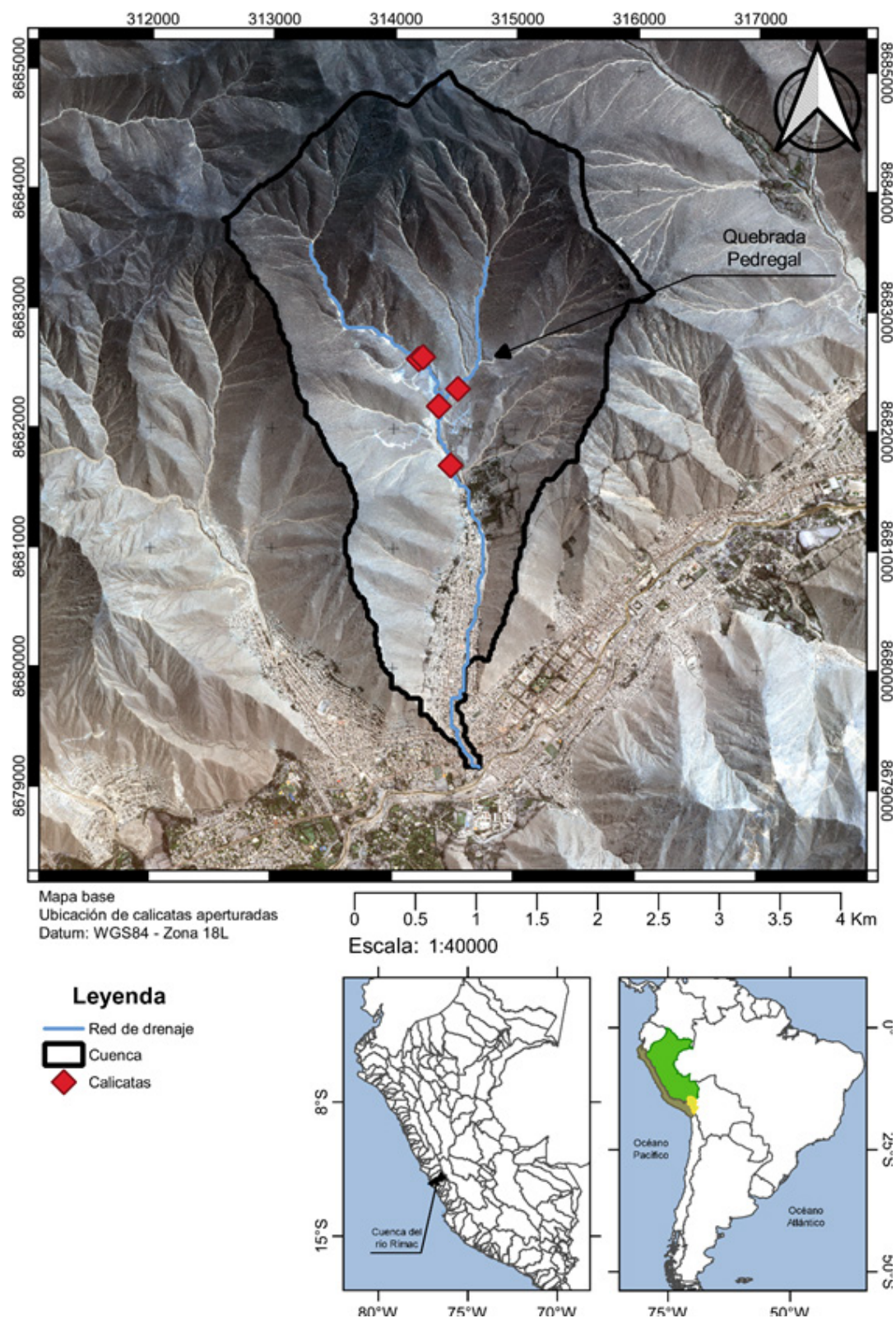


Figura 11. Ubicación de calicatas aperturadas realizadas para caracterizar las propiedades mecánicas de suelos en la quebrada Pedregal.

Fuente: Elaboración propia



**Tabla 2. Resumen de los ensayos de mecánica de suelos realizados en la quebrada Pedregal.**

Variable	Quebrada Pedregal					
	QP-1	QP-2	QP-3	QP-4	QP-5	
Profundidad (m)	1,15	-	1,15	0,8	1,05	1,25
Grava (%)	13	-	32	19	15	20
Arena (%)	81	-	67	80	84	59,33
Finos (%)	6	-	2	1	1	20,8
d95 (mm)	13,1	-	45,5	31,0	15,2	53,4
d90 (mm)	7,6	-	40,2	24,1	8,2	35,2
d50 (mm)	1,1	-	1,8	0,8	1,5	0,6
SUCS	SP-SM	SP con grava	SP con grava	SP con grava	SM con grava	
Permeabilidad ( $m^3s^{-1}$ )	-	-	-	-	-	2.84E-05
Humedad (%)	1,31	-	1,21	1,7	1,32	4,82
Densidad seca ( $gr^3cm^{-3}$ )	1,58	-	1,6	1,55	1,67	1,62
Gravedad específica (Gs)	2,682	-	-	-	-	2,71
Ángulo de fricción interna (°)	30,06	-	-	-	-	-
Cohesión aparente ( $Kg^3cm^{-2}$ )	0	-	-	-	-	-
Límite líquido (%)	-	-	-	-	-	21,03
Límite plástico (%)	-	-	-	-	-	19,47

### 3.1.5 Uso y cobertura del suelo

El mapa de uso y cobertura de suelos se puede observar en la Figura 12. Se ha encontrado 3 clases: pradera, zona urbana y suelo desnudo, de los que mayor cobertura presenta es el último. Mayor información se puede encontrar en el siguiente enlace: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3243509>.

Esta información es muy importante para representar la rugosidad superficial e interceptación de lluvia en el proceso de precipitación-escorrentía.

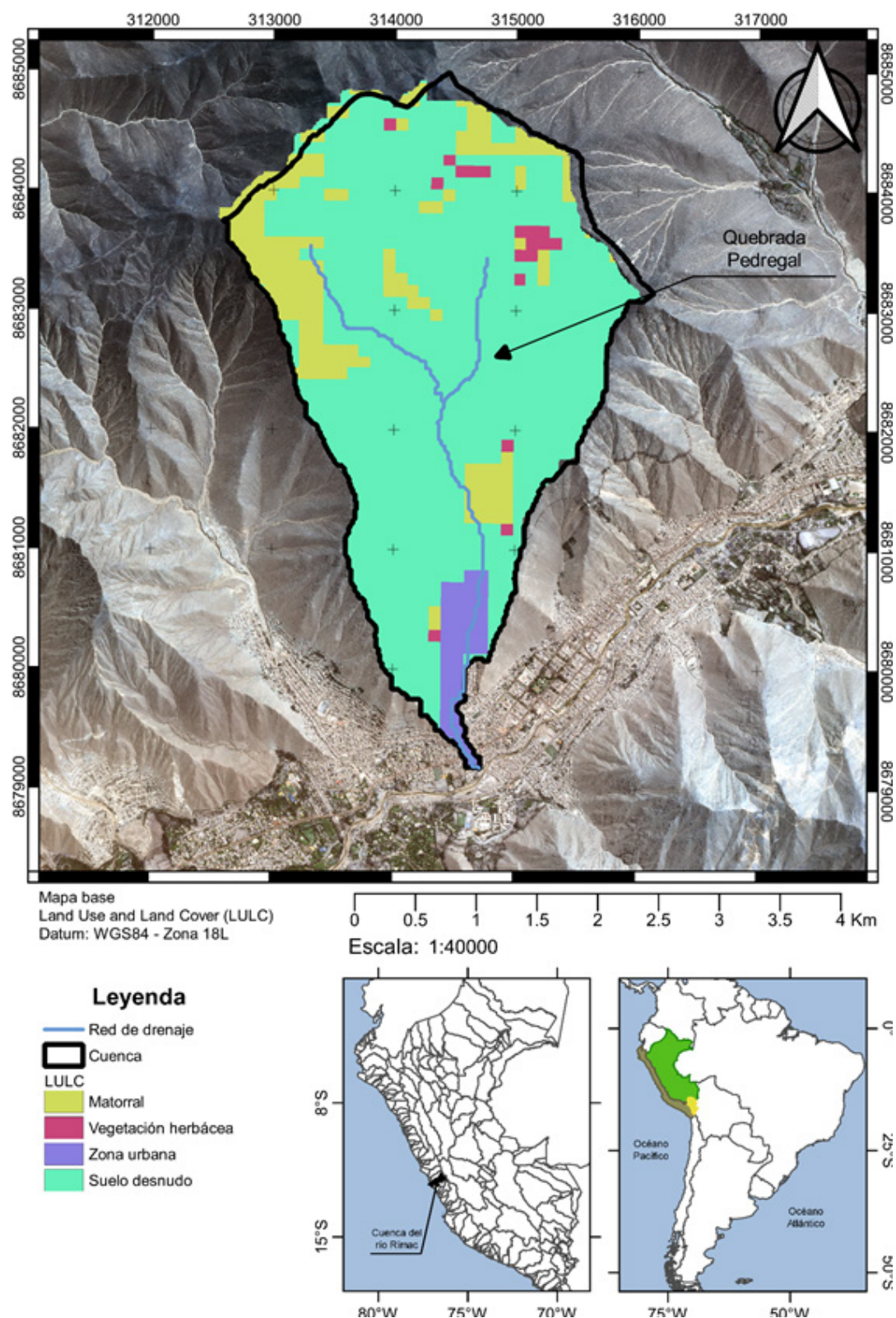


Figura 12. Distribución espacial del uso y cobertura del suelo en las quebrada Pedregal, en la localidad de Chosica.  
Fuente: Elaboración propia

## 4 ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS

### 4.1 Precipitación máxima diaria

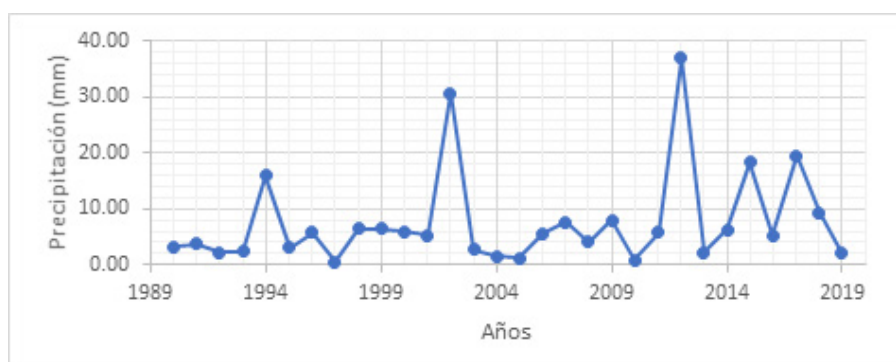
De las estaciones pluviométricas con las que se cuenta con información de precipitación máxima en 24 horas, se estableció que la más representativa es la estación Chosica, por presentar una longitud de 30 años de datos para poder realizar el análisis de frecuencias respectivo.

En la Tabla 3 y Figura 13 se muestra la información de precipitación máxima en 24 horas del registro de la estación Chosica. En la Figura 14 se muestra la frecuencia relativa y acumulada de la serie de tiempo de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.

**Tabla 3. Precipitación máxima en 24 horas registrada en la estación Chosica.**

<b>1990</b>	3,20	<b>2005</b>	1,20
<b>1991</b>	3,70	<b>2006</b>	5,60
<b>1992</b>	2,30	<b>2007</b>	7,70
<b>1993</b>	2,40	<b>2008</b>	4,00
<b>1994</b>	16,00	<b>2009</b>	8,00
<b>1995</b>	3,00	<b>2010</b>	0,80
<b>1996</b>	5,80	<b>2011</b>	5,70
<b>1997</b>	0,50	<b>2012</b>	37,00
<b>1998</b>	6,50	<b>2013</b>	2,30
<b>1999</b>	6,50	<b>2014</b>	6,20
<b>2000</b>	6,00	<b>2015</b>	18,30
<b>2001</b>	5,20	<b>2016</b>	5,30
<b>2002</b>	30,70	<b>2017</b>	19,50
<b>2003</b>	2,80	<b>2018</b>	9,40
<b>2004</b>	1,60	<b>2019</b>	2,00

Fuente: Senamhi.



**Figura 13. Serie de tiempo de la precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.**

Fuente: Senamhi.

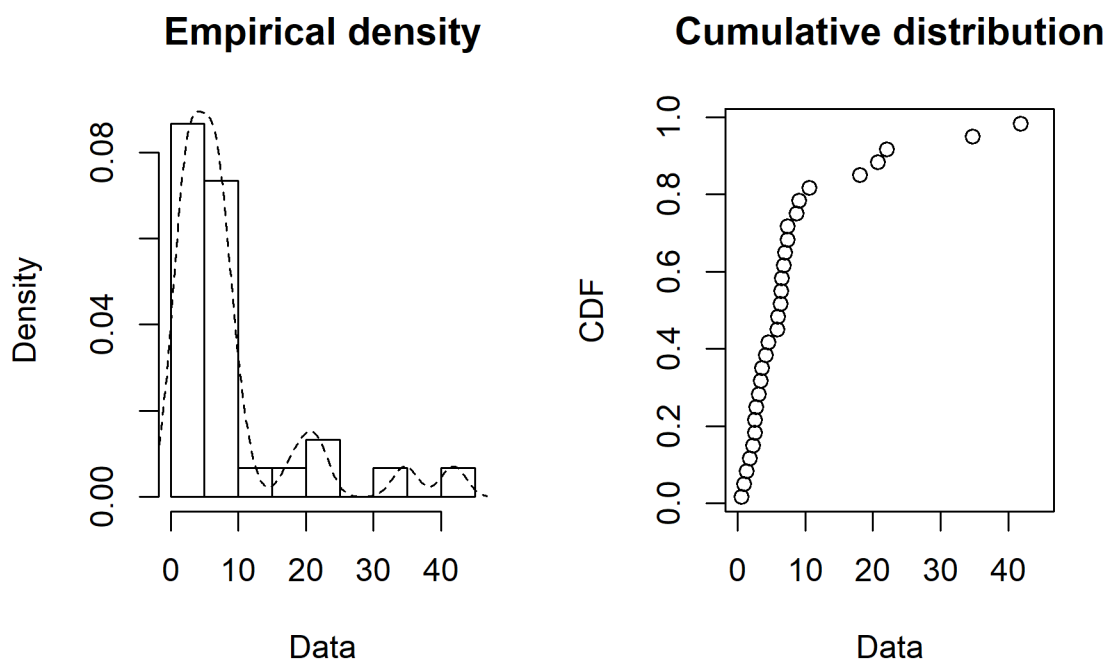


Figura 14. Frecuencia relativa y acumulada de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.  
Fuente: Elaboración propia

Tal como se puede observar en la Figura 15, la serie de precipitación máxima en 24 horas presenta una distribución de probabilidad empírica asimétrica positiva. El rango de variabilidad está comprendido entre 10.0 y 40.0 mm. Los valores más frecuentes se encuentran en la clase 0,0-10,0 mm.

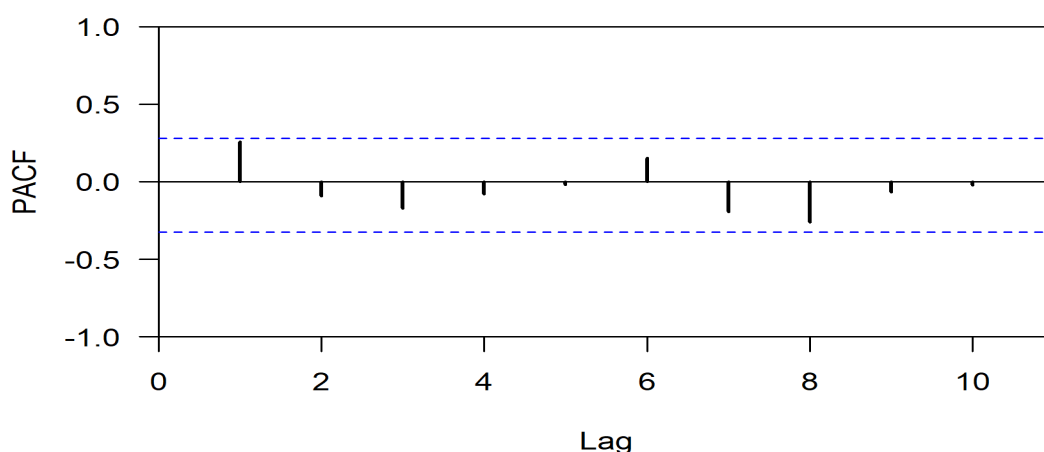


Figura 15. Autocorrelograma parcial de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.  
Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se puede observar que la serie de tiempo analizada es independiente (Ver Figura 15). De forma similar, se ha estimado los p-valores de las pruebas de Mann-Kendall (1987) y Pettit (1979) con

un nivel de significancia de 5%, y cuyas hipótesis nulas corresponden a que la serie de tiempo proviene de una muestra estacionaria y no presentan diferencias significativas en la media, respectivamente.

Los resultados se muestran en la Tabla 4 y sugieren que la serie de precipitación máxima en 24 horas es estacionaria.

**Tabla 4. Índices estadísticos para establecer la estacionariedad de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.**

Mann-Kendall p-value	Pettit p-value
0,20	0,72

## 4.2 Análisis de frecuencias

El objetivo en esta sección fue la de ajustar las distribuciones de probabilidad teóricas disponibles a los datos observados de precipitación máxima en 24 horas a fin de poder hacer extrapolaciones para diferentes periodos de retorno.

En este estudio se aplicó las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, el Criterio de Información de Akaike (*AIC* por sus siglas en inglés) y el Criterio de Información Bayesiano (*BIC* por sus siglas en inglés) como índices de bondad de ajuste.

La prueba de Kolmogorov-Smirnov consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia  $D$  entre la función de distribución de probabilidad observada  $F_0(X_m)$  y la estimada  $F(X_m)$ :

$$D = \max |F_0(X_m) - F(X_m)|$$

Con un valor crítico  $d$  que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado (95% de significancia). Si  $D < d$ , se acepta la hipótesis nula. La función de distribución de probabilidad observada se calcula como:

$$F_0(X_m) = 1 - \frac{m}{n + 1}$$

Donde:

$M$ : número de orden de dato  $X_m$  en una lista de mayor a menor

$n$ : número total de datos.

El criterio de información de Akaike mide la bondad de ajuste a partir de la máxima verosimilitud del modelo y la complejidad del modelo, teniendo en cuenta la cantidad de parámetros.

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

Donde:

$K$ : Número de parámetros

$L$ : Valor máximo en la función de verosimilitud

Por último, el Criterio de Información Bayesiano es muy parecido al criterio de Akaike, que incorpora en la medida de la complejidad al número de datos. El criterio viene dado por:

$$BIC = k\ln(n) - 2\ln(L)$$

Donde:

K: Número de parámetros

L: Valor máximo en la función de verosimilitud

n: número total de datos.

De las estaciones pluviométricas con las que se cuenta con información de precipitación máxima en 24 horas, se estableció que la más representativa es la estación Chosica, por encontrarse en una zona adyacente a las quebrada Pedregal.

Además, esta estación cuenta con una serie de registros confiables a lo largo de un periodo de 30 años (1990 – 2019), y es operada por el SENAMHI.

En la Tabla 6 se muestran los valores de las pruebas de bondad de ajuste generados por las diferentes distribuciones, donde se puede observar que la distribución LogNormal presenta un mejor ajuste acorde con las ocurrencias meteorológicas registradas en la zona de estudio.

**Tabla 5. Índices estadísticos de ajuste de las distribuciones teóricas de probabilidad.**

Distribución	Kolmogorov	AIC	BIC
	Smirnov		
Weibull	0,17	193,23	196,03
Lognormal	0,11	188,96	191,76
Normal	0,29	224,44	227,25
Gamma	0,18	192,73	195,53
Gumbel	0,20	203,27	206,08
Exponential	0,16	191,34	192,74

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 16, se muestra las distribuciones de probabilidad que se evaluaron para la serie de precipitaciones máximas de la estación Chosica. Se observa gráficamente que la distribución LogNormal es la que presenta mejor ajuste.

Luego de realizar la prueba de bondad de ajuste y de verificar que la distribución que mejor se ajusta es la distribución LogNormal, se calculó la serie de precipitaciones máximas para diferentes periodos de retorno.

Cabe resaltar que se realizó un ajuste a las precipitaciones máximas por el factor 1,13, utilizado para corregir los sesgos de subestimación de mediciones tomadas en intervalos fijos cada 24 horas, de acuerdo a lo recomendado por la World Meteorological Organization (WMO,1994).

Las precipitaciones máximas en 24 horas para diferentes periodos de retornos se presentan en la Tabla 6 y Figura 17. Se ha estimado la incertidumbre paramétrica de la distribución LogNormal a través de un método de remuestreo (Bootstrap simulation).

**Tabla 6. Magnitud de la precipitación máxima en 24 horas para diferentes periodos de retorno.**

	2	5	10	25	50	100	200	500
Mediana	5,40	12,29	18,91	29,92	40,25	52,55	67,08	90,17
2,50%	3,77	8,03	11,73	16,52	20,92	25,53	31,10	39,51
97,50%	7,70	18,19	29,55	52,07	73,34	100,97	137,56	197,62

Fuente: Elaboración propia



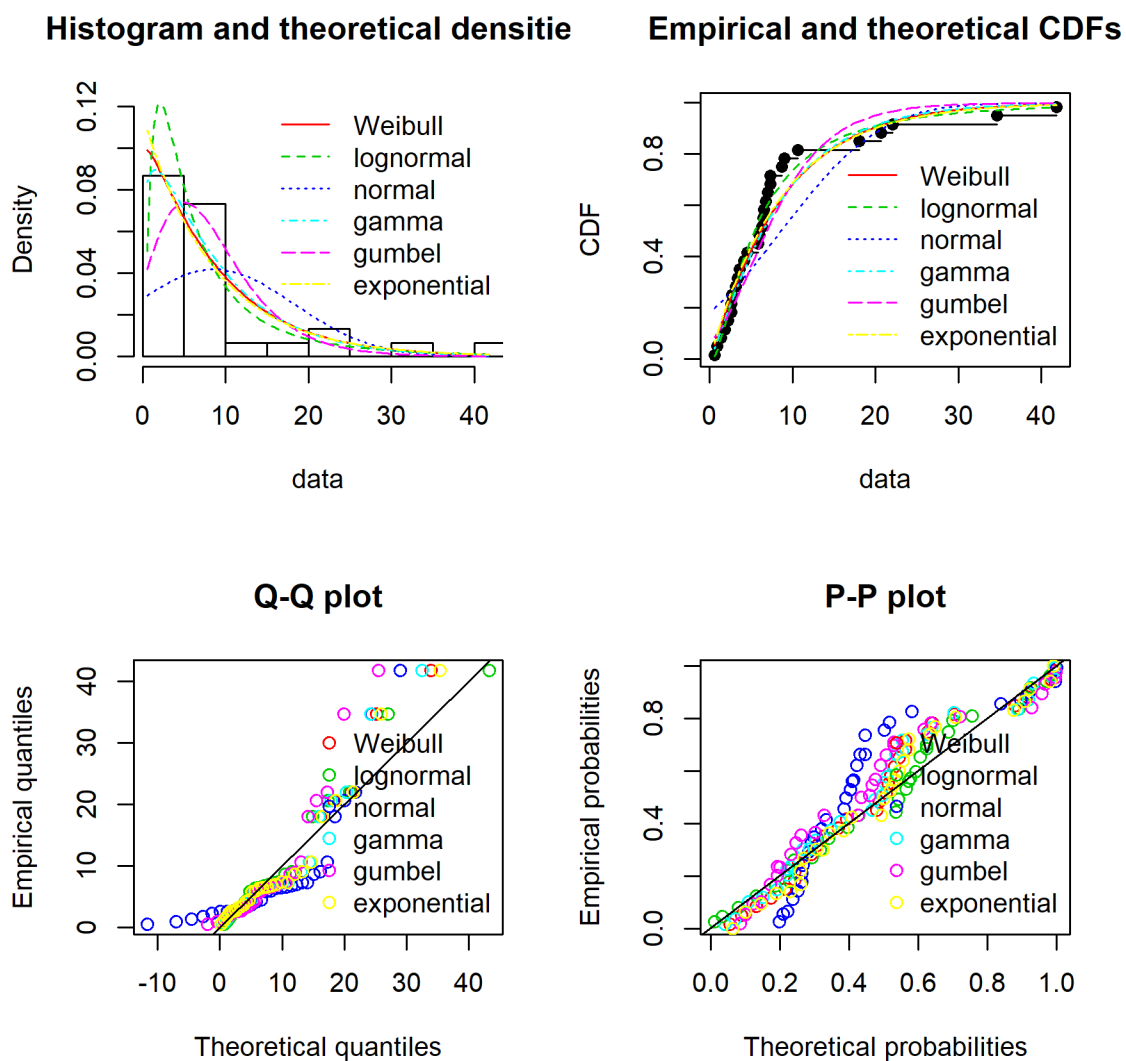


Figura 16. Distribuciones probabilísticas teóricas de ajuste de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.  
Fuente: Elaboración propia

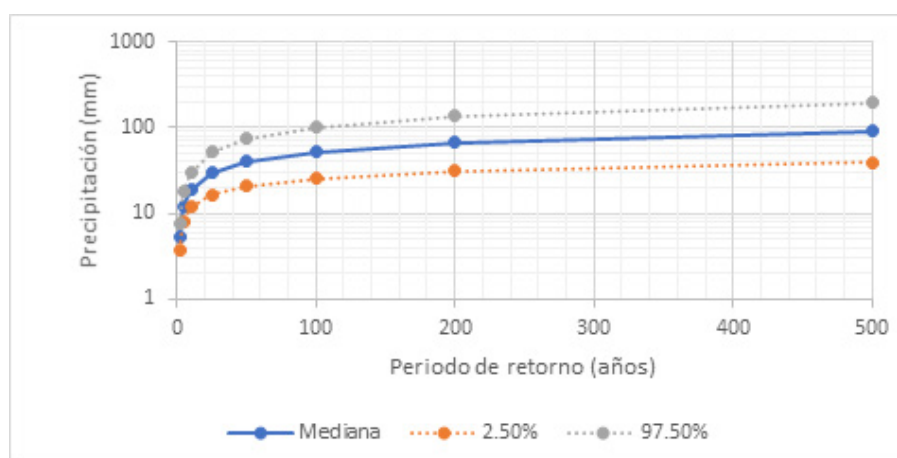


Figura 17. Relación periodo de retorno versus magnitud de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.  
Fuente: Elaboración propia

### 4.3 Desarrollo de curvas IDF

La estación de lluvia ubicada en la zona del proyecto no cuenta con registros pluviográficos que permitan obtener registros de intensidades máximas o no han sido proporcionadas para el desarrollo de la presente consultoría.

Para superar este problema se recurrió al principio conceptual, referente a que los valores extremos de lluvias de alta intensidad y corta duración, en el mayor de los casos, marginalmente dependientes de la localización geográfica, tienen propiedades físicas similares en la mayor parte del mundo, con base en el hecho de que estos eventos de lluvia están asociados con celdas atmosféricas.

Existen varios modelos para estimar la intensidad a partir de la precipitación máxima en 24 horas. Uno de ellos es el modelo de Frederick Bell (1969) que permite calcular la lluvia máxima en función del período de retorno, la duración de la tormenta en minutos y la precipitación máxima de una hora de duración y periodo de retorno de 10 años. La expresión es la siguiente:

$$P_t^T = (0.21 \log_e T + 0.52)(0.54t^{0.25} - 0.50)P_{60}^{10}$$

Donde:

t : Duración en minutos

T: Periodo de retorno en años

: Precipitación caída en t minutos con periodo de retorno de T años

: Precipitación caída en 60 minutos con periodo de retorno de 10 años

El valor de  $P_{60}^{10}$  puede ser calculado a partir del modelo de Yance Tueros, que estima la intensidad máxima horaria a partir de la precipitación máxima en 24 horas.

$$I = aP_{24}^b$$

I: intensidad máxima en mm/h

a, b: parámetros del modelo; 0.4602, 0.876, respectivamente

P24: precipitación máxima en 24 horas

Las curvas de intensidad-duración-frecuencia, se han calculado indirectamente, mediante la siguiente relación:

$$I = \frac{KT^m}{t^n}$$

Donde:

I : Intensidad máxima (mm/min)

K, m, n: factores característicos de la zona de estudio

T: período de retorno en años

t: duración de la precipitación equivalente al tiempo de concentración (min)



Si se toman los logaritmos de la ecuación anterior se obtiene:

$$\text{Log}(I) = \text{Log}(KT^m) - n\text{Log}(t)$$

O bien

$$Y = a_0 + a_1 X_1$$

Los factores  $a_0$  y  $a_1$ , se obtienen a partir de las intensidades máximas calculadas anteriormente con el modelo de Frederick Bell, mediante una regresión lineal. En la Tabla 8, se muestra los coeficientes obtenidos de la regresión lineal para diferentes periodos de retorno:

**Tabla 7. Valores de los parámetros de la relación IDF para la estación Chosica.**

PR (años)	Log10(KTm)	n
2	1,784	-0,621
5	1,894	-0,621
10	1,962	-0,621
25	2,038	-0,621
50	2,088	-0,621
100	2,133	-0,621
200	2,173	-0,621
500	2,222	-0,621

*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 18, se muestra las curvas de intensidad-duración-frecuencia para diferentes periodos de retorno y duración considerando los factores  $a_0$  y  $a_1$  mostrados previamente.

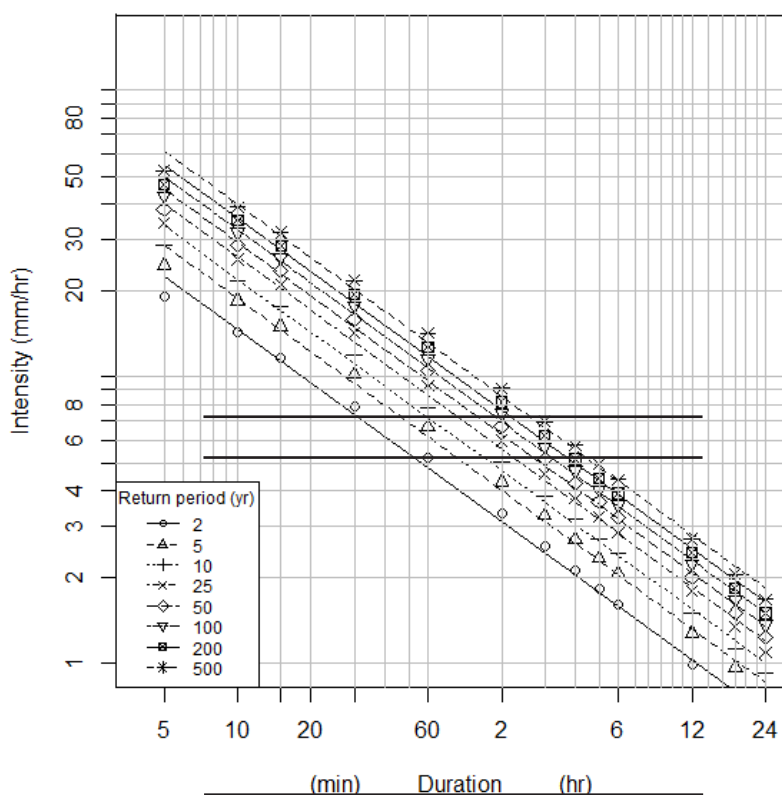


Figura 18. Curvas IDF de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica.  
Fuente: Elaboración propia

## 4.4 Tormenta de diseño

Para obtener los hietogramas de precipitación de diseño se utilizó la distribución de tormentas del Servicio de conservación de suelos (SCS/NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

El SCS/NRCS desarrolló hietogramas de diseño sintéticos para duraciones de tormenta de 6 y 24 horas. Estableció 4 tormentas de 24 horas de duración denominadas Tipo I, IA, II y III.

Para el presente estudio se utilizó la distribución de tormenta SCS-II que corresponde a lluvias orográficas de 6 horas de duración. Asimismo, se utilizó los perfiles de tormenta de las Curvas de Huff (segundo cuartil) que desarrolló el SENAMHI.

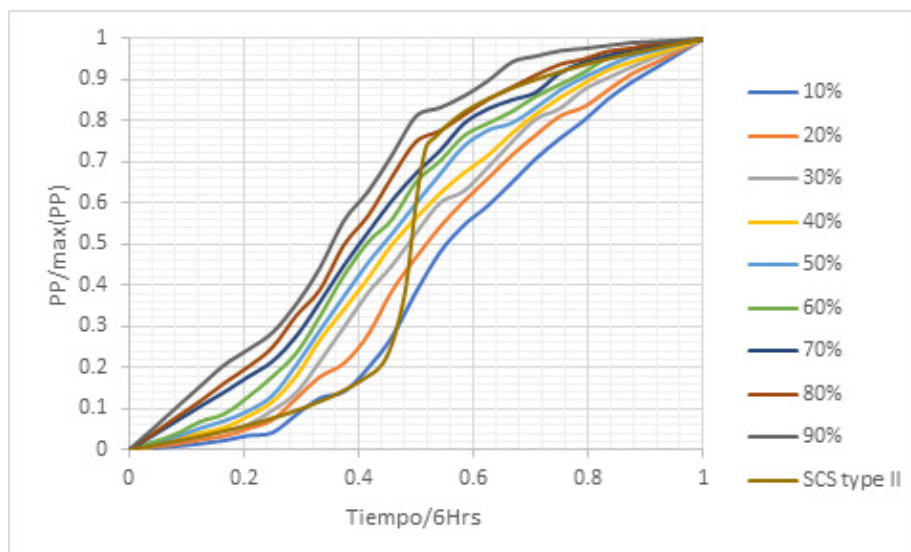


Figura 19. Perfiles de tormenta de 6 horas de duración tipo SCS-II y Curvas Huff (segundo curtil) usados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía.

Fuente: Elaboración propia

Para desarrollar las Curvas de Huff, el SENAMHI utilizó la serie de tiempo del producto de precipitación estimada por satélite PERSIANN-CCD.

Tal como se puede observar en la Figura 19, las Curvas de Huff (CH) representan la distribución temporal de la tormenta relacionada a diferentes percentiles. De lo anterior se podría sugerir que la respuesta fluvial de una tormenta con perfil CH-10% será más lenta que la CH-90%.

Cabe resaltar que el perfil SCS-II intercepta casi todos los perfiles CH. Lo que sugiere que esta curva podría corresponder a una condición media de la distribución temporal de la intensidad de lluvia durante toda la tormenta.

## 5 SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA HIDROLÓGICA

Para simular el proceso de precipitación-escorrentía y la producción de sedimentos, se ha utilizado el modelo TREX. Este modelo ha sido desarrollado en la Universidad de Colorado. La herramienta de código libre está disponible en el repositorio de la universidad en mención. ([https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce\\_old/Projects/TREX%20Web%20Pages/TREX-Home.html](https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/TREX%20Web%20Pages/TREX-Home.html)).

TREX es un modelo físicamente basado, Hortoniano, a escala de eventos hidrometeorológicos que simula diferentes procesos (ver Figura 20), tales como: almacenamiento superficial, interceptación, infiltración, transmisión, flujo superficial en terrazas en dos dimensiones (onda difusiva) y flujo en canales en una dimensión (onda cinemática).

Asimismo, simula la producción de sedimentos considerando los siguientes procesos físicos: erosión por salpicadura, laminar y en surcos, erosión fluvial (agradación-degradación de cauces), transporte total de sedimentos, deposición y el cambio morfológico de cuencas.

Sin embargo, tiene las siguientes limitantes: no considera la erosión en cárcavas, la iniciación de canales, la erosión en bancos, la formación de barras de sedimentos, la evolución de meandros.

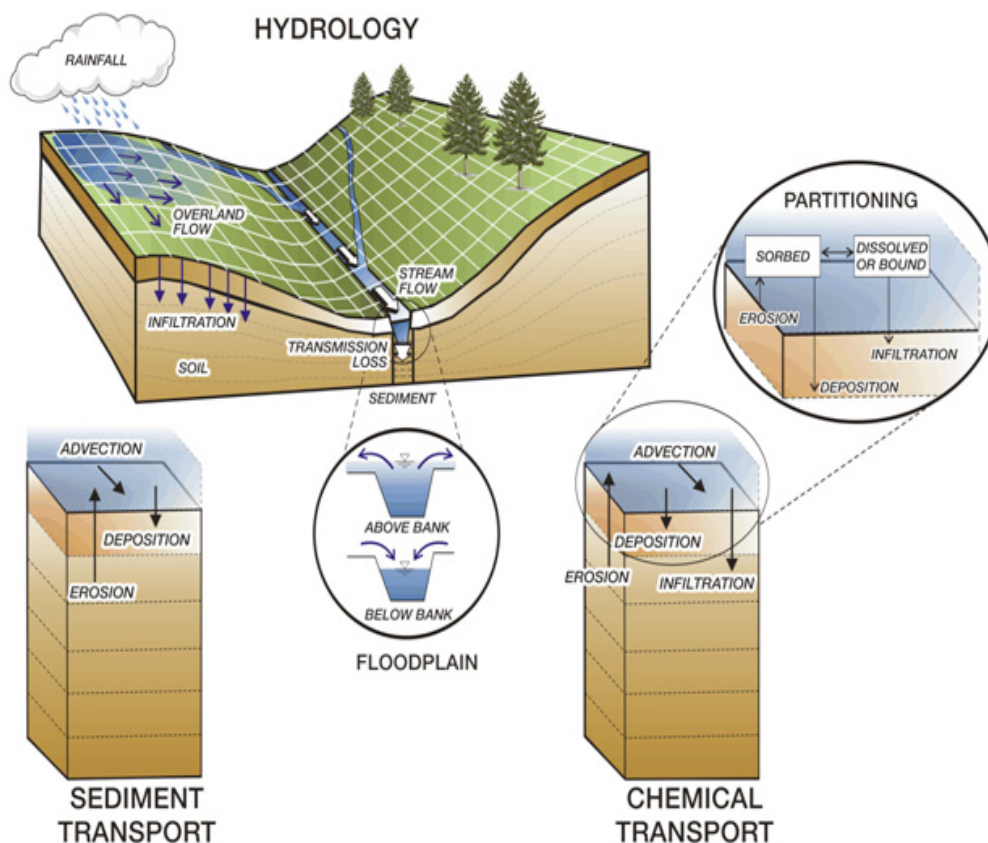


Figura 20. Esquema conceptual del modelo TRES.

Fuente: Elaboración propia

La representación espacial de la cuenca se realiza a través de la discretización topológica considerando especialmente la red de drenaje, tal como se muestra en la Figura 21 y 22. Se puede observar que se ha considerado un cauce principal con dos tributarios. Asimismo, se ha considerado una resolución espacial de 10 m para discretizar todas las propiedades físicas de las quebrada Pedregal.

Además de lo anterior, TRES necesita de información del uso y cobertura de suelos (Figura 14) para representar los parámetros de rugosidad superficial e interceptación. Asimismo, un mapa de regolita, tipo de suelo o geoformas (Figura 10) para representar la conductividad hidráulica saturada, presión de succión, etc.

Tal como se puede apreciar en la Tabla 9, se ha caracterizado los parámetros del modelo de infiltración de agua en el suelo de Green-Ampt. Se resalta que el parámetro más sensible corresponde a la conductividad hidráulica saturada. Los referidos valores han sido estimados en base a la experiencia del autor y no ha sido posible validarlos pues en las quebradas Pedregal no se mide la producción de agua y sedimentos cuando se activan.



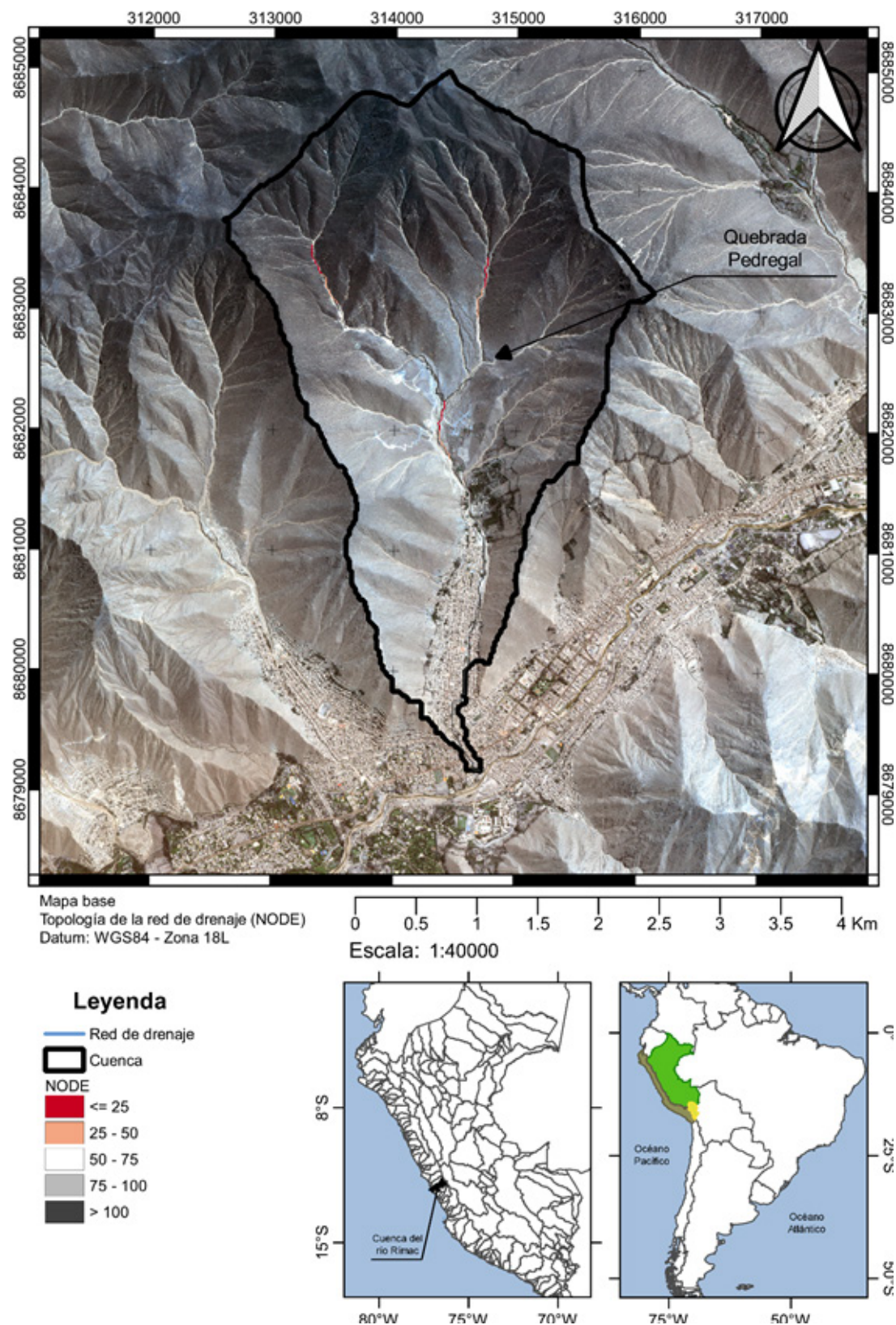


Figura 21. Representación topológica de la quebrada Pedregal (NODE).

Fuente: Elaboración propia



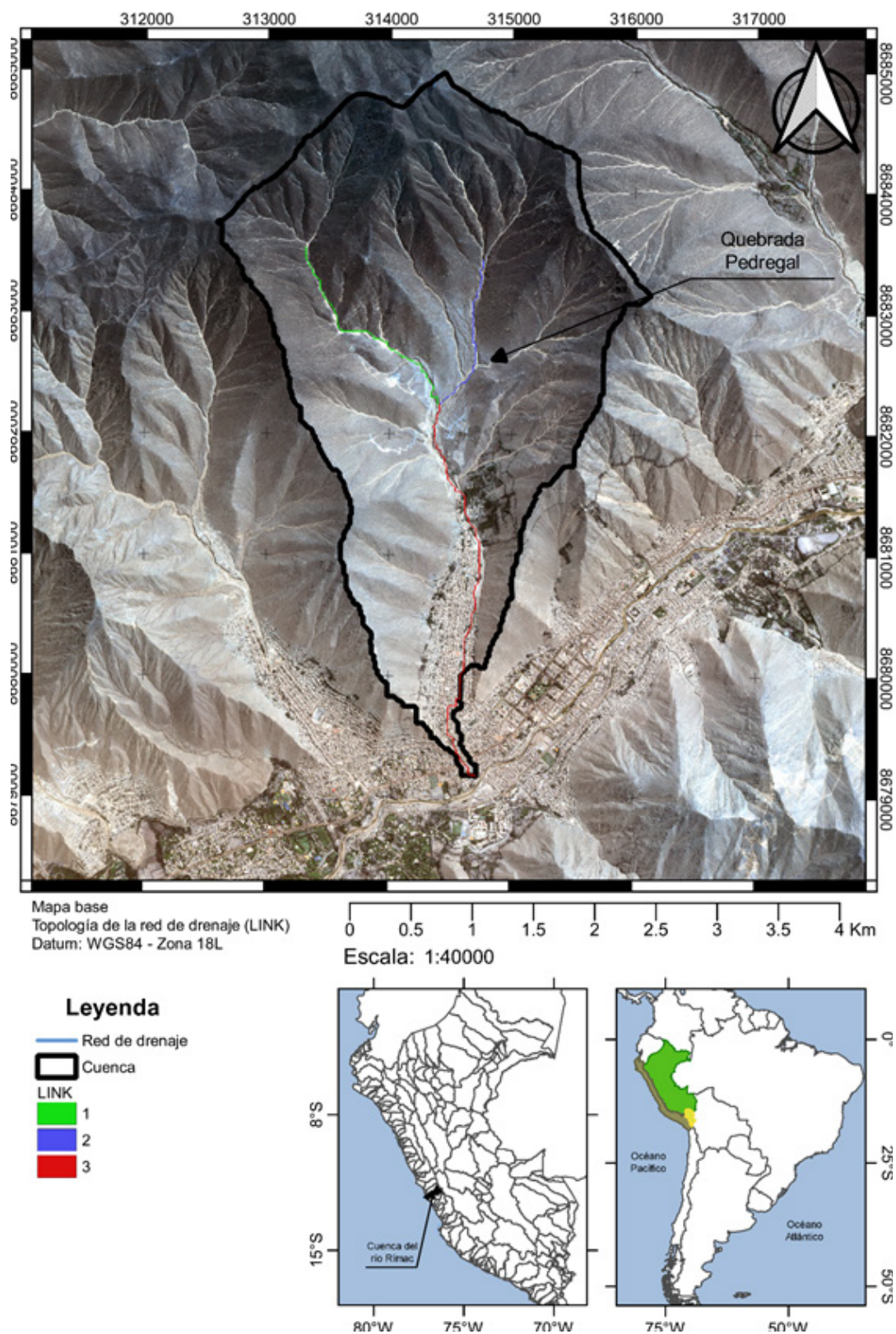


Figura 22 Representación topológica de la quebrada Pedregal (LINK).  
Fuente: Elaboración propia

**Tabla 8. Parámetros para caracterizar el proceso de infiltración del agua en el suelo.**

Geoforma	Parámetros		
	kh ( $\text{m}^1\text{s}^{-1}$ )	cps (m)	soilmd (-)
Valley	3,0E-09	0,01	0,29
Lower slope (warm)	5,5E-10	0,01	0,29
Upper slope (warm)	8,5E-10	0,01	0,29
Mountain/divide	9,5E-12	0,01	0,29
Upper slope	9,5E-12	0,01	0,29
Peak/ridge (warm)	5,5E-12	0,01	0,29

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en base a los resultados encontrados y lo descrito líneas arriba (acápites 3.1.4 Mecánica de suelos) es recomendable simular el proceso de precipitación-escorrentía considerando impermeable la superficie de los depósitos sedimentarios.

Por otro lado, para caracterizar la intercepción de la lluvia y la rugosidad superficial (número de Manning), se ha usado los valores que se muestran en la Tabla 9. Cabe resaltar que la mayor parte de la cuenca está clasificada como suelo desnudo, en donde los depósitos aluviales, coluviales y la roca fragmentada está expuesta. Es por ello que se justifica la magnitud de los valores de rugosidad seleccionados.

Como se puede observar, se ha considerado una intercepción de lluvia nula debido a que la cobertura vegetal en toda la cuenca es escasa y las praderas no contienen un área foliar importante.

**Tabla 9. Parámetros para caracterizar la rugosidad superficial e intercepción de la lluvia.**

LULC	Parámetros	
	n (-)	intercp (mm)
Pradera	0,05	0
Zona Urbana	0,04	0
Suelo desnudo	0,07	0

Fuente: Elaboración propia

## 5.1 Resultados

Considerando que tenemos 10 perfiles de tormenta (CH10-90% y SCS-II) de 6 horas de duración, se ha simulado el proceso de precipitación-escorrentía para el periodo de retorno de 100 años.

Tal como se puede observar en la Figura 23, que corresponde al escenario de 100 años de periodo de retorno y el perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración, se resalta que el patrón espacial de la profundidad de flujo obedece al gradiente topográfico y está fuertemente influenciado por la red de drenaje. Se han obtenido profundidades de flujo de hasta 1 metro en el cauce principal de la quebrada Pedregal.

Las Figuras 24 muestran el hidrograma de avenida para el periodo de retorno de 100 años. Se resalta que el perfil de tormenta tiene una fuerte influencia sobre el tiempo al pico y centro de gravedad de los hidrogramas.

Es notable como el perfil de tormenta CH90% presenta una rápida respuesta de la escorrentía superficial. Asimismo, el hidrograma de CH10% recién comienza a ascender aproximadamente 2 horas después de CH90%. Todos los demás perfiles CH20-80% están entre los antes mencionados.



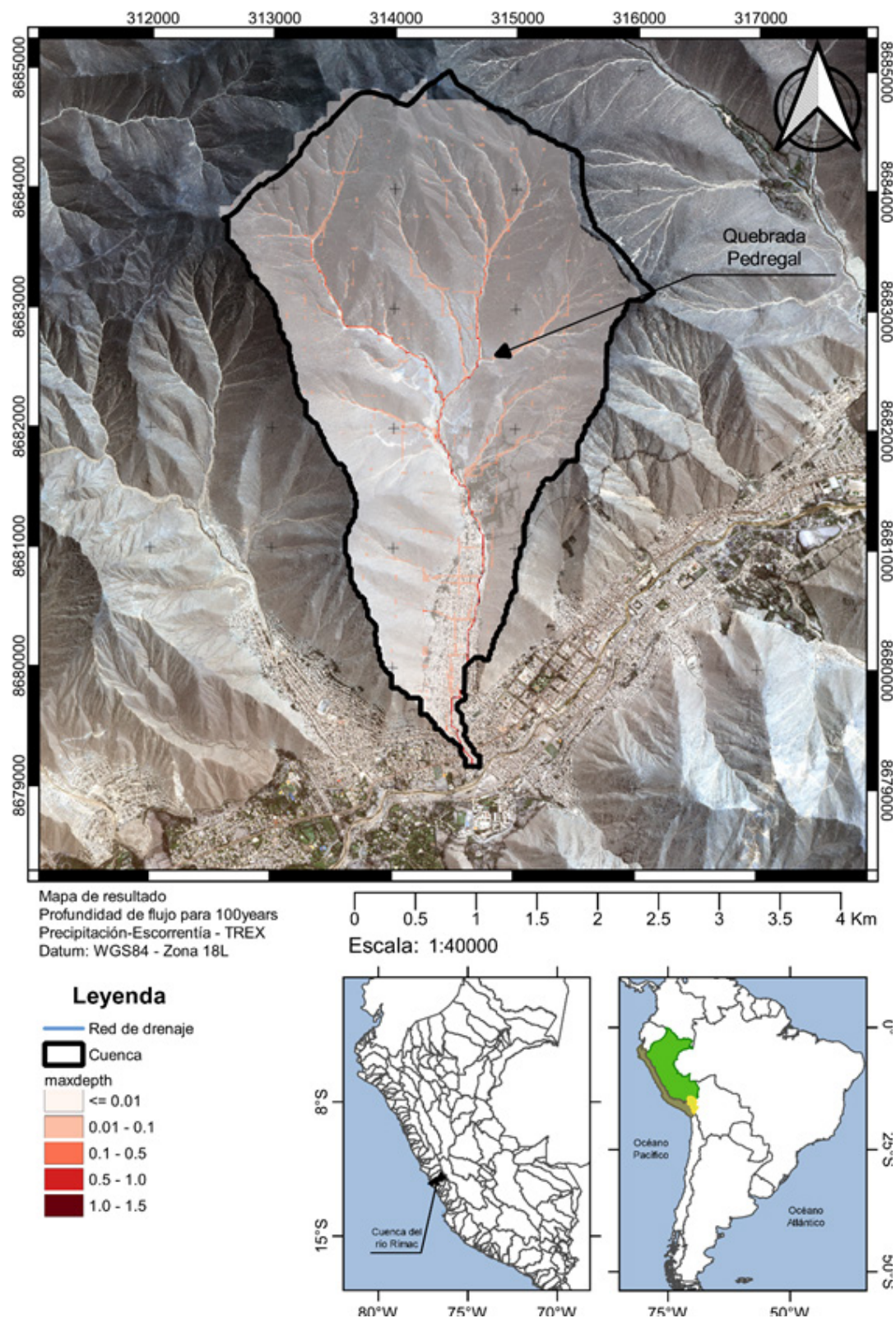


Figura 23. Resultados de la simulación del proceso de precipitación escorrentía usando el modelo TREX para la quebrada Pedregal.

Fuente: Elaboración propia



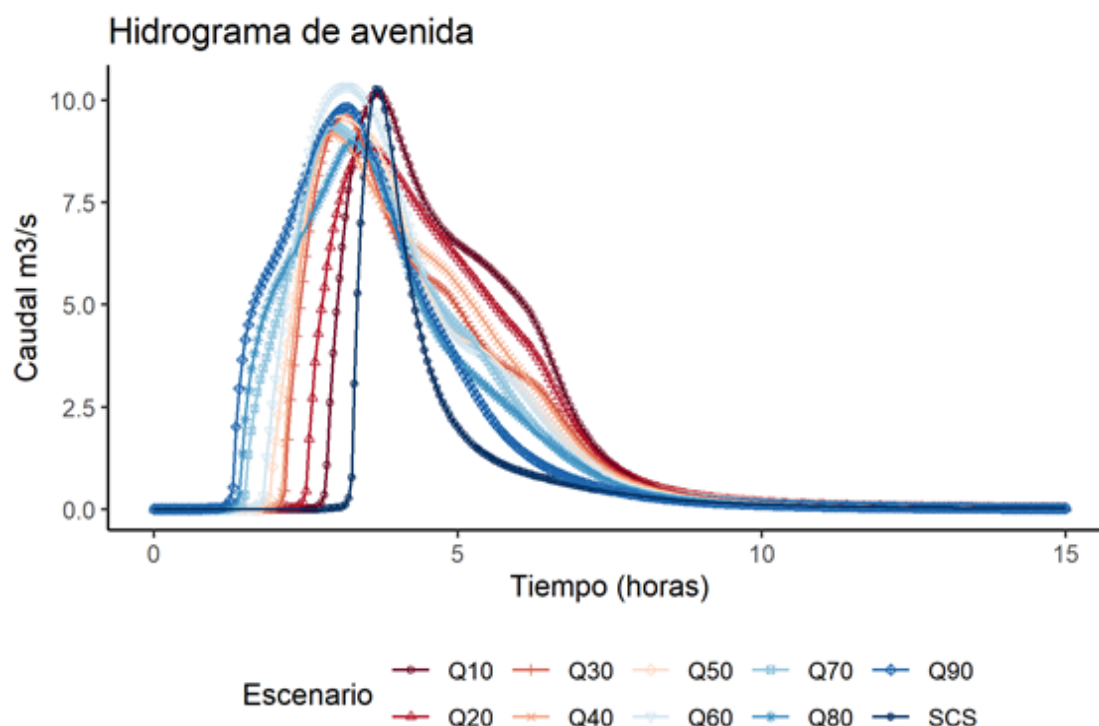


Figura 24. Hidrograma de avenida para un periodo de retorno de 100 años y distintos perfiles de tormenta de la quebrada Pedregal usando el modelo TREX.

Fuente: Elaboración propia

Además, los resultados del perfil de tormenta SCS-II sugieren que la respuesta hidrológica es más violenta, debido a que la pendiente de ascenso y descenso del hidrograma es mayor a todos los casos evaluados entre CH10-90%.

## 6 SIMULACIÓN DEL TRÁNSITO DE FLUJOS DE ESCOMBROS

Para la simulación del tránsito de flujos hiperconcentrados se ha utilizado el modelo Flo2D (FLO-2D Software, Inc., 2018). Esta herramienta simula el flujo de escombros en dos dimensiones considerando las ecuaciones del flujo en superficie libre promediadas en la profundidad. La ecuación de continuidad está dada como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = i$$

Donde  $h$  es la profundidad del flujo de escombros (m),  $u$  es la profundidad media del flujo en el eje  $x$  ( $m^1s^{-1}$ ),  $v$  es la profundidad media del flujo en el eje  $y$  ( $m^1s^{-1}$ ) e  $i$  es la intensidad de la lluvia ( $mm^1hr^{-1}$ ).

Asimismo, las ecuaciones de momentum se describe de la siguiente manera:

$$S_{fx} = S_{bx} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial u}{g \partial t} - u \frac{\partial u}{g \partial x} - v \frac{\partial u}{g \partial y}$$

$$S_{fy} = S_{by} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial v}{g \partial t} - u \frac{\partial v}{g \partial x} - v \frac{\partial v}{g \partial y}$$

Donde  $S_{fx}$ ,  $S_{fy}$  corresponden a la pendiente de fricción en los ejes x-y, respectivamente.  $S_{bx}$ ,  $S_{by}$  son la pendiente de fondo en los ejes x-y, respectivamente.  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m^1s^{-2}$ ). Las ecuaciones de momentum representan el balance de las fuerzas representativas en las dos dimensiones consideradas (x-y). Incluyen, de izquierda a derecha, pendiente de fricción afectada por la potencia de los sedimentos en contacto (modelo reológico), pendiente de fondo debido a la gravedad, el gradiente de presión, el término de aceleración local de las fuerzas de inercia, y la aceleración convectiva.

Flo2D usa un modelo reológico cuadrático presentado por O'Brien y Julien (1998), que incluye esfuerzos de cedencia, esfuerzos viscosos, esfuerzos cohesivos y esfuerzos turbulentos. Los parámetros para caracterizar el modelo reológico son: la rugosidad superficial, la concentración en volumen (CV), el esfuerzo de cedencia, la viscosidad, y la densidad de los sedimentos. La experiencia indica que los parámetros más importantes son la rugosidad superficial y la concentración en volumen de la mezcla agua-sedimentos. El modelo reológico cuadrático de Flo2D está representado por la siguiente ecuación:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta u}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 u^2}{h^{4/3}}$$

Donde  $S_y$  es la pendiente de cedencia,  $S_v$  es la pendiente viscosa, y  $S_{td}$  es la pendiente turbulenta-dispersiva,  $\tau_y$  es el esfuerzo de cedencia de Bingham,  $\eta$  es la viscosidad dinámica de Bingham,  $\gamma_m$  peso unitario del flujo de escombros,  $K$  resistencia del flujo laminar,  $n$  coeficiente de rugosidad de Manning,  $h$  profundidad del flujo de escombros,  $u$  velocidad del flujo de escombros.



Figura 25. Profundidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.

Fuente: Elaboración propia



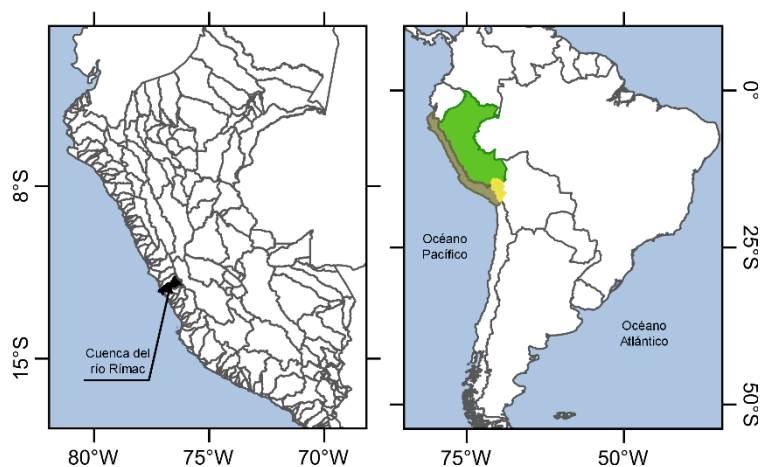
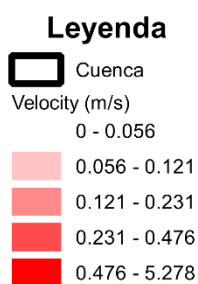


Figura 26. Velocidad máxima de flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.

Fuente: Elaboración propia

En nuestro caso, se ha utilizado el mismo DSM documentado en líneas arriba. Como se requiere mayor detalle en la simulación del flujo de escombros, se ha remuestreado el DSM y se ha desarrollado una malla computacional de 3 m de resolución espacial.

Como condiciones de borde de aguas arriba se ha utilizado los hidrogramas generados en la simulación del proceso de precipitación-escorrentía con TREX. Para la de aguas abajo, se ha utilizado una condición de borde libre.

## 6.1 Modelo reológico

Para seleccionar los parámetros del modelo reológico usado para simular el tránsito de los flujos de escombros que produce la quebrada Pedregal, hemos considerado los siguientes criterios:

1. El valor seleccionado para la concentración en volumen de los sedimentos fue de 45%, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos de mecánica de suelos realizados en la quebrada en estudio. Este valor está estrechamente relacionado con la producción de sedimentos de la quebrada asociado a eventos extremos (100 años PR).
2. La relación entre el esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica,  $\tau_y$ ,  $\gamma$ ,  $\eta$  y la concentración en volumen,  $C_v$ , se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

Cabe resaltar que valores referenciales se pueden encontrar en el manual de usuario de Flo2D en función de ensayos estándar de mecánica de suelos.

3. El valor de Manning seleccionado tiene en cuenta la rugosidad superficial de los granos de sedimentos, a través de la granulometría, así como la generada por los elementos macrorugosos que se han podido observar en el trabajo de campo. Es por ello que se ha seleccionado el valor de 0.05 para representar la rugosidad total en el tramo de simulación.
4. La gravedad específica utilizada corresponde a los resultados de laboratorio de la matriz de sedimentos.

En la Tabla 10 se puede observar los parámetros del modelo reológico cuadrático utilizado para simular el tránsito de flujos de escombros en las quebrada en la quebrada Pedregal.

**Tabla 10. Parámetros usados en el modelo reológico para la simulación con Flo2D.**

Input value		Initial value	
Bingham yield stress	$\alpha_1$	0,07	0,000462
	$\beta_1$		11,24
Bingham dynamic viscosity $\eta$	$\alpha_2$	38,94	0,0811
	$\beta_2$		13,72
Manning's roughness coefficient n		0,05	
Specific gravity of debris flow Gs		2,671	
Resistance parameter for Laminar flow K		2285	
Volumetric concentratios of sediment $C_v$		0,45	

Fuente: Elaboración propia

## 6.2 Resultados

En las Figuras 26 y 27 se puede observar los resultados del tránsito del flujo de escombros para un escenario de 100 años de periodo de retorno y un perfil de tormenta SCS-II de 6 horas de duración.

Los resultados sugieren que, de ocurrir una tormenta con PR de 100 años, se afectaría una buena parte de la población asentada. Asimismo, se observa que la magnitud de la profundidad del flujo de agua-sedimentos podría llegar a los 6,6 m, así como la velocidad a los  $4,5\text{m}^1\text{s}^{-1}$ .

Además, considerando que la Cv representa la producción de sedimentos en cada quebrada, se ha evaluado los efectos de su variabilidad sobre la simulación del flujo de escombros, tal como se puede observar en la Tabla 11 y Figuras 28.

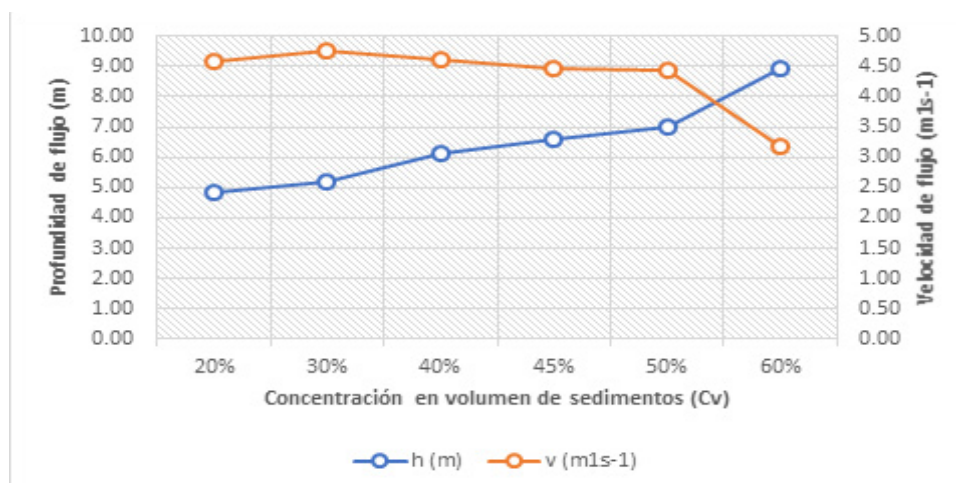
Los resultados sugieren que cuando la Cv es menor que 50%, la velocidad máxima del flujo de escombros se incrementa. Esto es debido a que las fuerzas relacionadas a la resistencia son menores a las fuerzas inerciales del flujo de escombros.

Asimismo, cuando la Cv es mayor que 50%, la profundidad máxima del flujo de escombros se incrementa, pero la velocidad decrece drásticamente.

**Tabla 11. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros.**

Cv	Quebrada Pedregal	
	h (m)	v ( $\text{m}^1\text{s}^{-1}$ )
20%	4,83	4,59
30%	5,20	4,76
40%	6,12	4,60
45%	6,58	4,46
50%	6,99	4,43
60%	8,94	3,18
70%	-	-
80%	-	-

Fuente: Elaboración propia



**Figura 27. Relación entre la concentración en volumen y la profundidad-velocidad máxima del flujo de escombros para la quebrada Pedregal.**

Fuente: Elaboración propia



Cabe resaltar que la  $C_v$  tiene influencia en otros parámetros como el esfuerzo de cedencia y la viscosidad dinámica, tal como quedo evidenciado anteriormente.

Por tanto, los resultados sugieren que es sumamente importante estimar la producción de sedimentos de las quebradas cuando ocurren tormentas extremas, debido a que está estrechamente relacionado con la concentración en volumen de sedimentos. En otras palabras, que la relación entre la lluvia, la escorrentía y producción de sedimentos es un fenómeno altamente no lineal que debe de ser analizado en conjunto.

La Tabla 12 presenta los resultados de la sensibilidad del número de Manning ( $n$ ) sobre la simulación del flujo de escombros en la quebrada Pedregal. Como es lógico, cuando la rugosidad superficial aumenta, aumenta la profundidad del flujo y disminuye la velocidad máxima. Asimismo, aumenta el volumen de agua-escombros depositados en el dominio computacional (cono aluvial donde está asentada la población) y el área total inundada.

**Tabla 12. Relación entre el número de Manning ( $n$ ) y la simulación del flujo de escombros.**

n Manning	Quebrada Pedregal			
	h (m)	v ( $m^1s^{-1}$ )	Sed+H <sub>2</sub> O ( $m^3$ )	A ( $m^2$ )
0,025	6,41	4,81	27537,39	175527,00
0,050	6,58	4,46	27657,79	176814,00
0,100	5,97	3,82	28065,99	181053,00
0,200	7,36	3,76	29280,58	191808,00

Fuente: Elaboración propia

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ha realizado la simulación en cascada del fenómeno de iniciación y propagación de flujos de escombros de la quebrada Pedregal utilizando los modelos numéricos TREX y Flo2D.

Se ha realizado el análisis de frecuencias de la precipitación máxima en 24 horas de la estación Chosica y se han estimado las magnitudes para distintos periodos de retorno y se ha considerado lluvia uniforme sobre la quebrada Pedregal. Se han usado 10 perfiles de tormenta de 6 horas de duración. Sin embargo, se recomienda estudiar la variabilidad espacial de las tormentas y la aumentar la densidad de estaciones de registro de lluvia en tiempo real.

Se ha encontrado que la principal fuente de sedimentos corresponde a depósitos sedimentarios aluviales recientes y antiguos localizados en las márgenes de la red de drenaje. Asimismo, la superficie de estos depósitos se encuentra cementada; es decir, a efectos del proceso de precipitación-escorrentía, presenta una muy baja capacidad de infiltración del agua en el suelo. Se recomienda realizar ensayos de mineralogía de rocas para comprobar esta afirmación. Además, para efectos prácticos, se recomienda utilizar valores de conductividad hidráulica saturada en el orden de  $10^{-12} m^1s^{-1}$  o menores.

Se ha encontrado que los depósitos sedimentarios aluviales contienen clastos semi-redondeados embutidos en una matriz de arenas con escasa presencia de limos (<6%). Esto tiene incidencia directa sobre las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla de agua y sedimentos. De hecho, el fenómeno de movimientos en masa que da lugar es el de flujo de escombros activado por lluvias extremas.

Los resultados sugieren que los principales modos de erosión corresponden a la del tipo laminar,

surcos, cárcavas y fluvial (cauce y bancos). Asimismo, debido a que el abanico aluvial está habitado por la población, no se evidencia zonas naturales de deposición de sedimentos.

Se ha simulado el proceso de precipitación-escorrentía con el modelo TREX. Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad de la topología de la red de drenaje y la rugosidad superficial sobre la simulación. Asimismo, simular la producción de sedimentos asociada a diferentes periodos de retorno para que la concentración en volumen ingrese como input al modelo Flo2D.

Se ha simulado el tránsito del flujo de escombros utilizando el modelo Flo2D y se ha realizado un análisis de sensibilidad de la concentración en volumen y coeficiente de rugosidad.

Se ha encontrado que el coeficiente de Manning tiene un impacto muy alto sobre el proceso de flujo de escombros y la morfología final del tramo de simulación. Asimismo, la concentración en volumen tiene efectos sobre los parámetros reológicos (esfuerzo de cedencia y viscosidad dinámica) y podría amplificar los efectos del flujo de escombros.

No se ha podido validar las simulaciones debido a que en la quebrada Pedregal no se cuenta con mediciones de las variables de flujo de agua ni sedimentos. Sin embargo, en base a la experiencia, los resultados son muy razonables. Se recomienda instalar cámaras LSPIV o de seguridad para registrar el paso del flujo de agua y sedimentos cuando se activen por lluvias intensas. Asimismo, para poder calibrar los procesos físicos, se recomienda utilizar el método geomorfológico, que implica realizar vuelos con Dron y obtener DSM antes y después de un evento de flujo de escombros importante y estimar las zonas de erosión y deposición de sedimentos en toda la quebrada y compararla con la simulación en cascada.

Para definir los umbrales de inundación de un sistema de alerta temprana, se recomienda considerar dos variables: la intensidad media de la precipitación y la duración total de la tormenta. Para efectos prácticos se recomienda simular los modelos configurados considerando diferentes escenarios en base a la variabilidad de estos dos factores.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chen, H.X., Zhang, L.M. (2015). EDDA 1.0: integrated simulation of debris flow erosion, deposition and property changes. *Geoscientific Model Development* 8(3), 829-844.
- [2] Iverson, R.M., Ouyang, C.J. (2015). Entrainment of bed material by earth-surface mass flow: Review and reformulation of depth-integrated theory. *Reviews of Geophysics* 53, 27-58.
- [3] Lee, B.Y., Mok, H.Y., Lee, T.C. (2010). The latest climate change in Hong Kong and its implications for the engineering sector, in: DHKO in the HKIE Conf. on climate change-Hong Kong Engineers' Perspective, Hong Kong Observatory, Government of Hong Kong SAR, Hong Kong.
- [4] O'Brien, J.S., Julien, P.Y. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows, in: Conference, Delineation of Landslide, Flash Flood, and Debris Flow Hazard. Utah Water Research Laboratory, Utah State University, Utah, pp, 260-280.
- [5] O'Brien, J.S., Julien, P.Y. (1998). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering* 114(8), 877-887.
- [6] FLO-2D Software, Inc. (2018). Flo-2D Reference Manual. 153p
- [7] O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(2), 244-261.
- [8] Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics* 13, 57-77.
- [9] Takahashi, T. (2014). Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. CRC press, London.
- [10] Quan Luna, B., Blahut, J., van Asch, T., van Westen, C., Kappes, M. (2016). ASCHFLOW – A dynamic landslide run-out model for medium scale hazard analysis. *Geoenvironmental Disasters* 3(1), 29.
- [11] Zhang, S., Zhang, L.M., (2017). Impact of the 2008 Wenchuan earthquake in China on subsequent long-term debris flow activities in the epicentral area. *Geomorphology* 276, 86-103.

## 9 ANEXOS

### 9.1 Perfil estratigráfico de las calicatas




PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SUELO					LAMINA No. 1				
SOLICITANTE:					QP - 1				
PROYECTO :									
UBICACIÓN :									
Referencia:			Registrado por		Ing. Erick Rosales A.				
Profundidad 1.15 m			Fecha		: 17 de Mayo de 2020				
Prof. (m)	Símbolo	Descripción	Valores Medios		Humedad				
					L.P. ——— L.L.				
					10	20	30	40	
0.05		Capa superficial compuesto por arena media a gruesa, alterada.							
0.30		Arena media a gruesa, con fragmentos de roca, presencia de minerales, color beige, ligeramente húmeda. SP							
0.50		Fragmentos de roca con matriz de arena media a gruesa, color beige, ligeramente húmeda, de densidad media. SP							
1.00									
1.15									
1.50		Bloques de roca							
2.00									

Figura 28. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal.




PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SUELO				LAMINA No. 2				
SOLICITANTE:				QP - 2				
PROYECTO :								
UBICACIÓN :								
Referencia:			Registrado por	Ing. Erick Rosales A.				
Profundidad 1.15 m			Fecha	17 de Mayo de 2020				
Prof. (m)	Símbolo	Descripción	Valores Medios	Humedad L.P. ——— L.L. 10 20 30 40				
0.10		Capa superficial compuesto por arena media a gruesa, alterada.						
0.20		Árena gravosa, color beige, ligeramente húmeda. SW						
0.50		Fragmentos de roca con matriz de arena media a gruesa, color beige, ligeramente húmeda, de densidad media. SP						
1.00								
1.15								
		Bloques de roca						
1.50								
2.00								

Figura 29. Perfil estratigráfico de la calicata #2 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal.


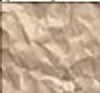
PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SUELO				LAMINA No. 3				
SOLICITANTE:				QP - 3				
PROYECTO :								
UBICACIÓN :								
Referencia:			Registrado por Ing. Erick Rosales A.					
Profundidad 0.80 m			Fecha : 17 de Mayo de 2020					
Prof. (m)	Simbolo	Descripción	Valores Medios	Humedad				
				L.P.				L.L.
				10	20	30	40	
0.05		Capa superficial compuesto por arena gravosa con fragmentos de roca, alterada.						
0.50		Fragmentos de roca con matriz de arena gravosa, color beige, ligeramente húmeda, de densidad media. Sw						
0.80		Roca						
1.00								
1.50								
2.00								

Figura 30. Perfil estratigráfico de la calicata #3 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal.





PERFIL ESTRATIGRAFICO DEL SUELO					LAMINA No. 4				
SOLICITANTE:					QP - 4				
PROYECTO :									
UBICACIÓN :									
Referencia:			Registrado por		Ing. Erick Rosales A.				
Profundidad 1.05 m			Fecha		: 17 de Mayo de 2020				
Prof. (m)	Símbolo	Descripción	Valores Medios	Humedad					
				L.P. ——— L.L.					
				10	20	30	40		
- - - - - - - - - 0.50 0.55		Capa superficial compuesto por arena media a gruesa, con grava aislada, alterada.							
- - - 0.80		Arena gravosa, con fragmentos de roca, color beige, ligeramente húmeda, de densidad media. Sw							
- - 1.00 1.05		Fragmentos de roca con matriz de arena gravosa, color beige, ligeramente húmedo, de densidad media a alta. Sw							
- - - - - - 1.50 - - - - - - - - - - 2.00									

Figura 31. Perfil estratigráfico de la calicata #4 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal.

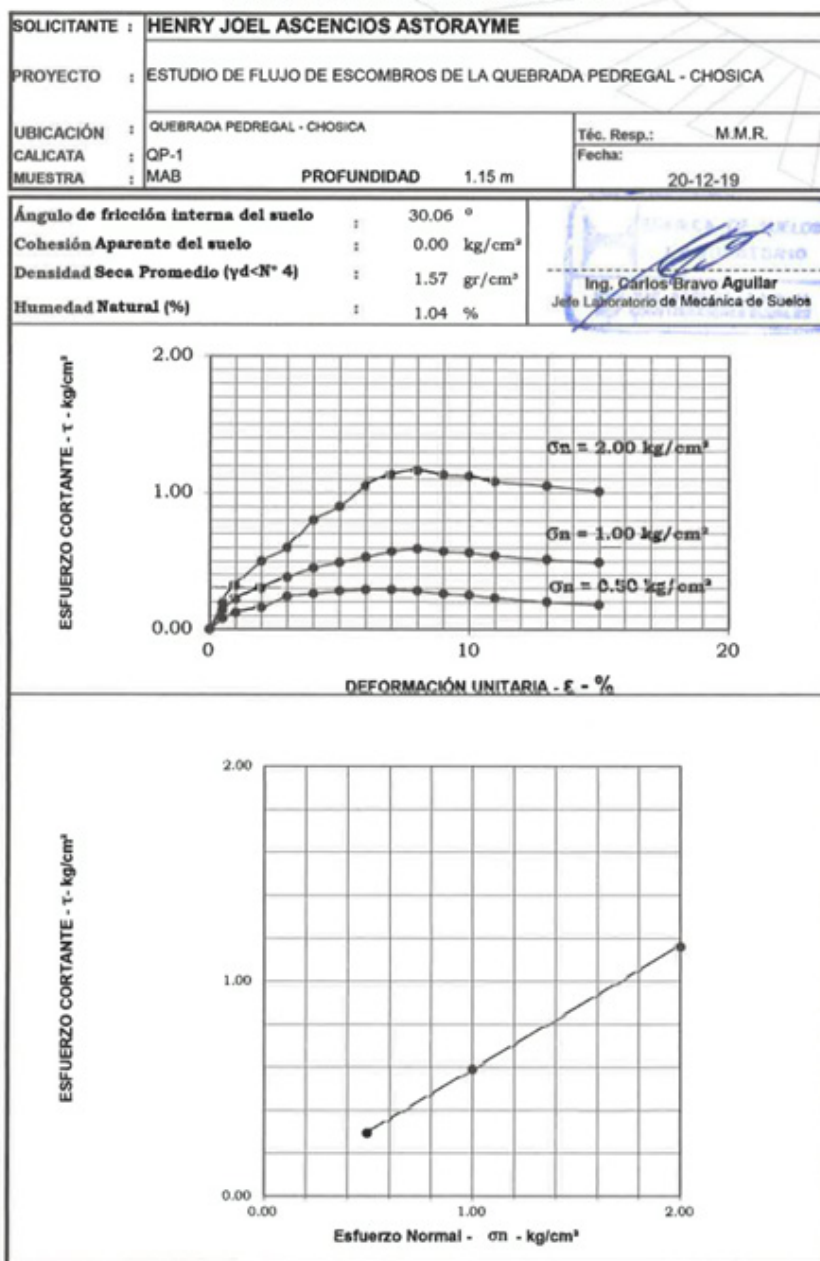
*Figura 32. Perfil estratigráfico de la calicata #1 en el depósito sedimentario aluvial de la quebrada Pedregal.*

## 9.2 Resultados de laboratorio



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**  
ENSAYO DE CORTE DIRECTO ASTM D - 3080



Observación : Muestra remoldeada a densidad proporcionada por el solicitante

Figura 33. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 1 (QP-1) de la quebrada Pedregal.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**

**SOLICITANTE** : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME  
**PROYECTO** : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA  
**UBICACIÓN** : QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA  
**CALICATA** : QP-1  
**PROFUNDIDAD** : 1.15 m  
**FECHA** : La Molina , 20 de diciembre de 2019 **Téc.Resp.:** MMR

**ENSAYO DE CORTE DIRECTO**

<b>Especimén</b>	:	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Lado (cm)</b>	:	6.00	6.00	6.00
<b>Altura (cm)</b>	:	2.544	2.544	2.544
<b>Densidad Seca ( gr/cm³)</b>	:	1.570	1.570	1.570
<b>Humedad Inicial (%)</b>	:	1.04	1.04	1.04
<b>Esfuerzo Normal (kg/cm²)</b>	:	0.50	1.00	2.00
<b>Deformación Unitaria</b> ( E - % )		<b>Esfuerzo Cortante</b> (kg/cm²)		
0.5		0.08	0.14	0.19
1.0		0.12	0.22	0.30
2.0		0.16	0.30	0.50
3.0		0.24	0.38	0.60
4.0		0.26	0.45	0.80
5.0		0.28	0.49	0.90
6.0		0.29	0.53	1.05
7.0		0.29	0.57	1.13
8.0		0.28	0.59	1.16
9.0		0.26	0.57	1.13
10.0		0.25	0.56	1.12
11.0		0.23	0.54	1.08
13.0		0.20	0.51	1.05
15.0		0.18	0.49	1.01

**Ángulo de Fricción Interna del Suelo ( ° )** 30.06  
**Cohesión Aparente del Suelo (kg/cm²)** 0.00



**Ing. Carlos Bravo Aguilar**  
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**

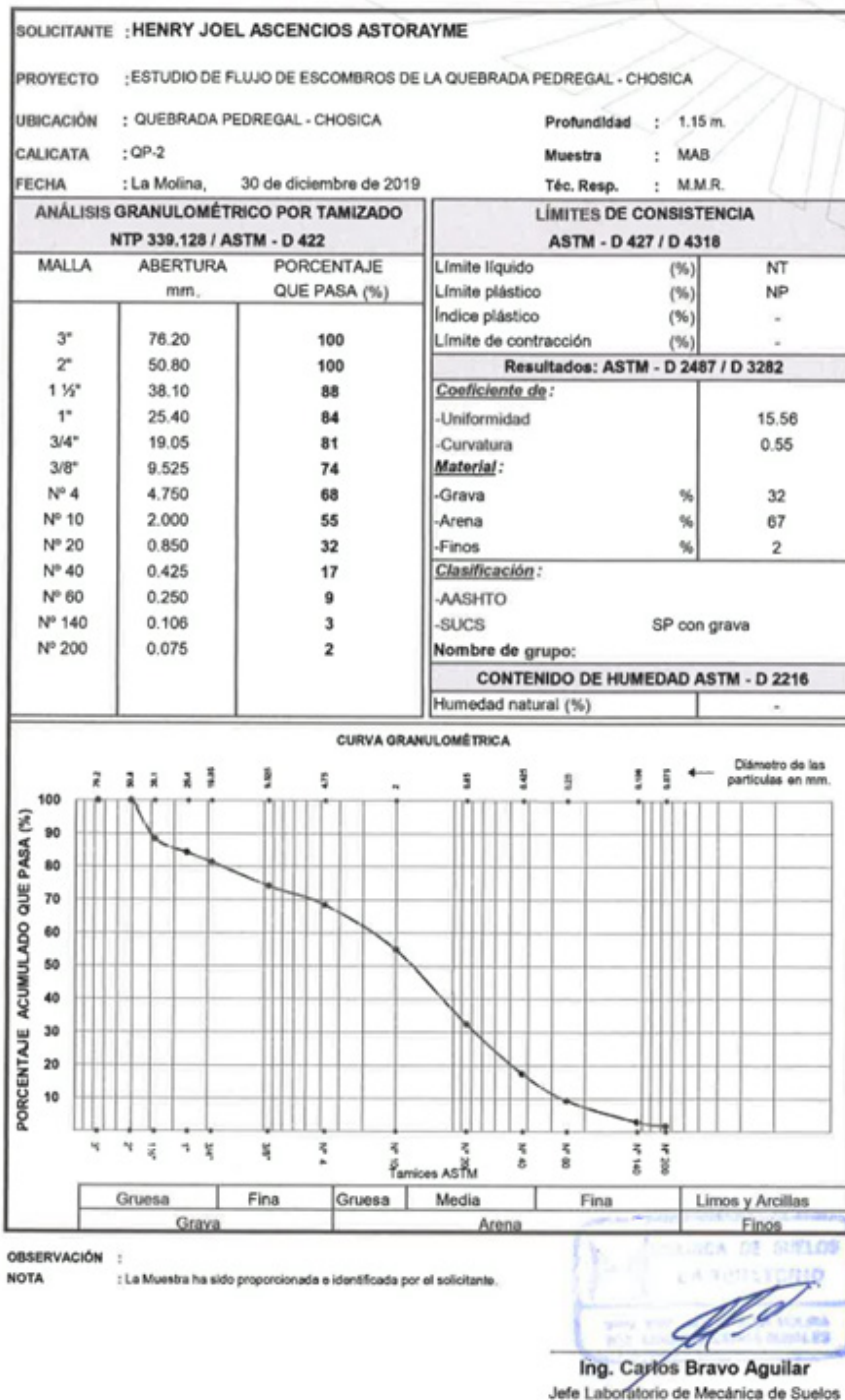


Figura 35. Resultados del ensayo de determinación de peso específico para el punto 2 (QP-2) de la quebrada Pedregal.



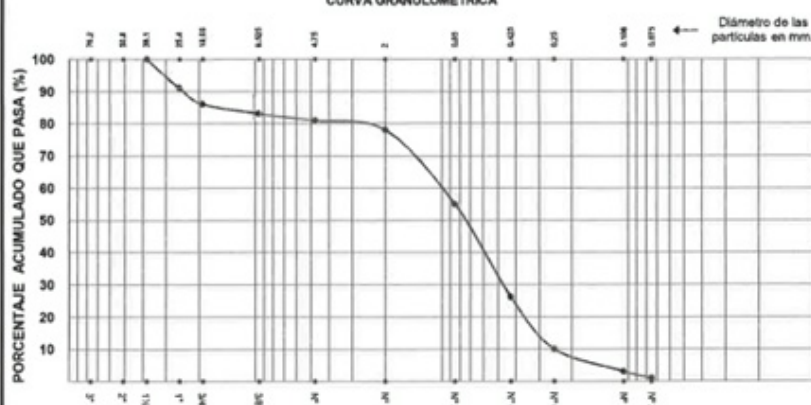
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**

<b>SOLICITANTE :</b> HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME		
<b>PROYECTO :</b> ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA		
<b>UBICACIÓN :</b> QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA	<b>Profundidad :</b> 0.80 m.	
<b>CALICATA :</b> QP-3	<b>Muestra :</b> MAB	
<b>FECHA :</b> La Molina, 30 de diciembre de 2019	<b>Téc. Resp. :</b> M.M.R.	
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO</b> NTP 339.128 / ASTM - D 422		<b>LÍMITES DE CONSISTENCIA</b> ASTM - D 427 / D 4318
<b>MALLA</b>	<b>ABERTURA</b> mm.	<b>PORCENTAJE QUE PASA (%)</b>
3"	76.20	
2"	50.80	
1 1/2"	38.10	100
1"	25.40	91
3/4"	19.05	86
3/8"	9.525	83
Nº 4	4.750	81
Nº 10	2.000	78
Nº 20	0.850	55
Nº 40	0.425	26
Nº 60	0.250	10
Nº 140	0.106	3
Nº 200	0.075	1
		<b>Límite líquido (%)</b> NT <b>Límite plástico (%)</b> NP <b>Índice plástico (%)</b> - <b>Límite de contracción (%)</b> - <b>Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282</b> <b>Coefficiente de:</b> -Uniformidad 10.12 -Curvatura 0.36 <b>Material:</b> -Grava % 19 -Arena % 80 -Finos % 1 <b>Clasificación:</b> -AASHTO -SUCS SP con grava <b>Nombre de grupo:</b> <b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b> Humedad natural (%) -

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



Gruesa	Fina	Gruesa	Media	Fina	Limos y Arcillas
Grava		Arena		Finos	

**OBSERVACIÓN :**  
**NOTA :** La Muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.


  
**Ing. Carlos Bravo Aguilar**  
 Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 36. Resultados tabulares del ensayo de corte directo para el punto 3 (QP-3) de la quebrada Pedregal.



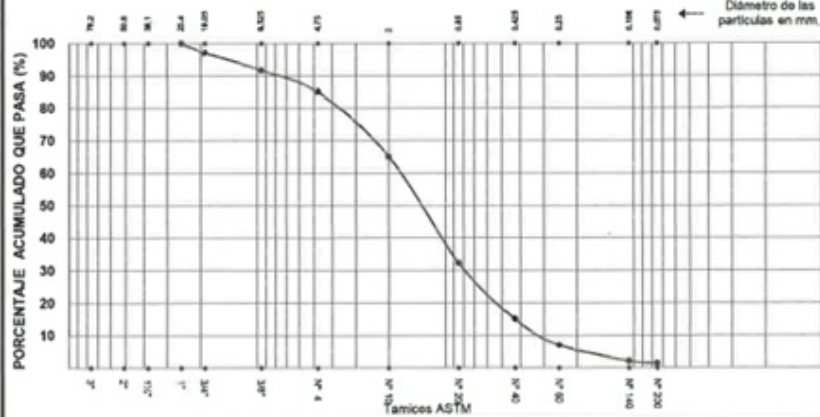
**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**

<b>SOLICITANTE :</b> HENRY JOEL ASCENCIO ASTORAYME		
<b>PROYECTO :</b> ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA		
<b>UBICACIÓN :</b> QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA		<b>Profundidad :</b> 1.05 m.
<b>CALICATA :</b> QP-4		<b>Muestra :</b> MAB
<b>FECHA :</b> La Molina, 30 de diciembre de 2019		<b>Téc. Resp. :</b> M.M.R.
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO</b> NTP 339.128 / ASTM - D 422		<b>LÍMITES DE CONSISTENCIA</b> ASTM - D 427 / D 4318
<b>MALLA</b>	<b>ABERTURA</b> mm.	<b>PORCENTAJE</b> QUE PASA (%)
3"	76.20	
2"	50.80	
1 1/2"	38.10	
1"	25.40	100
3/4"	19.05	97
3/8"	9.525	92
Nº 4	4.750	85
Nº 10	2.000	65
Nº 20	0.850	32
Nº 40	0.425	15
Nº 60	0.250	7
Nº 140	0.106	2
Nº 200	0.075	1
		<b>Límite líquido (%)</b> NT <b>Límite plástico (%)</b> NP <b>Índice plástico (%)</b> - <b>Límite de contracción (%)</b> -
<b>Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282</b>		
<b>Coefficiente de:</b>		
-Uniformidad		10.91
-Curvatura		0.56
<b>Material:</b>		
-Grava		15
-Arena		84
-Finos		1
<b>Clasificación:</b>		
-AASHTO		
-SUCS SP con grava		
<b>Nombre de grupo:</b>		
<b>CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216</b>		
<b>Humedad natural (%)</b>		-

**CURVA GRANULOMÉTRICA**



Gruesa	Fina	Gruesa	Media	Fina	Limos y Arcillas
Grava		Arena		Finos	

**OBSERVACIÓN :**

**NOTA :** La Muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

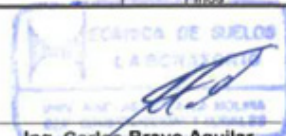
  
**Ing. Carlos Bravo Aguilar**  
 Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 37. Resultados gráficos del ensayo de corte directo para el punto 4 (QP-4) de la quebrada Pedregal.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

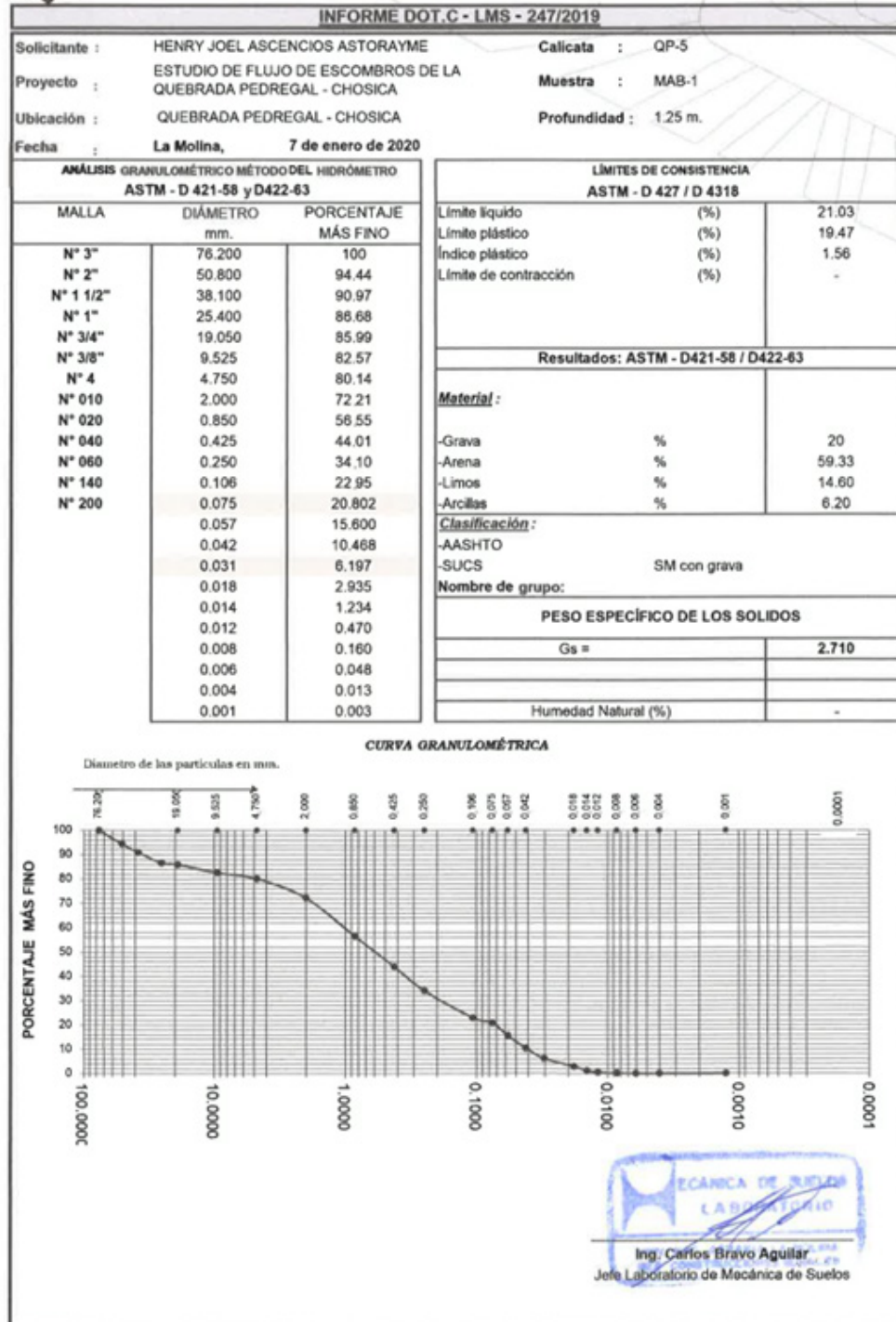


Figura 38. Resultados del ensayo de granulometría para el punto 5 (QP-5) de la quebrada Pedregal.





**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**

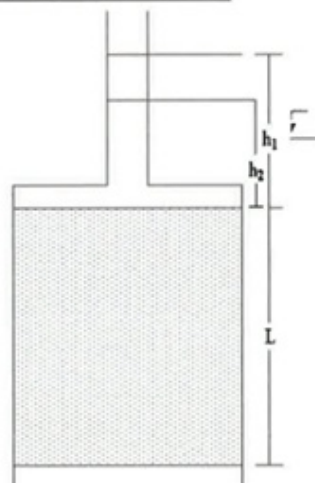
<b>SOLICITANTE</b>	:	HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME
<b>PROYECTO</b>	:	ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA
<b>UBICACIÓN</b>	:	QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA
<b>MUESTRA</b>	:	QP-5
<b>PROFUNDIDAD</b>	:	1.25 m
<b>FECHA</b>	:	La Molina, 24 de diciembre de 2019
		<b>Téc.Resp.: MMR</b>

**ENSAYO DE PERMEABILIDAD CARGA CONSTANTE ASTM D2434-68**

<b>Fecha de Ensayo</b>	:	23/12/2019
<b>Area de Muestra</b>	:	182.41 cm <sup>2</sup>
<b>Diametro de muestra</b>	:	15.24 cm
<b>Altura de muestra</b>	:	11.43 cm
<b>Densidad</b>	:	1.62 gr/cm <sup>3</sup>

$$K_{20} = QL/ATH$$

$$k_{20} = 2.8395 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$$



**Observación :** Especimen remoldeado a densidad proporcionado por solicitante.



**Ing. Carlos Bravo Aguilar**  
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

Figura 39. Resultados del ensayo de permeabilidad para el punto 5 (QP-5) de la quebrada Pedregal.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
Laboratorio de Mecánica de Suelos

**INFORME DOT.C - LMS - 247/2019**

**SOLICITANTE** : HENRY JOEL ASCENCIOS ASTORAYME  
**PROYECTO** : ESTUDIO DE FLUJO DE ESCOMBROS DE LA QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA  
**UBICACIÓN** : QUEBRADA PEDREGAL - CHOSICA  
**ENSAYO** : Determinación del Peso Específico  
**FECHA** : 7 de enero de 2020  
**Téc. Resp.:** M.M.R.

**DETERMINACIÓN DE PESO ESPECÍFICO - NTP 339.131**

**Calicata** : QP-5  
**Muestra** : MAB  
**Profundidad** : 1.25 m

$$Pe = \frac{Wsseco}{Wsseco + (Wfa - Wfas)} : \boxed{2.710}$$



**Ing. Carlos Bravo Aguilar**  
Jefe Laboratorio de Mecánica de Suelos

### 9.3 Panel fotográfico



Figura 41. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Puntos de interés con registro fotográfico



Figura 42. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil sedimentos.



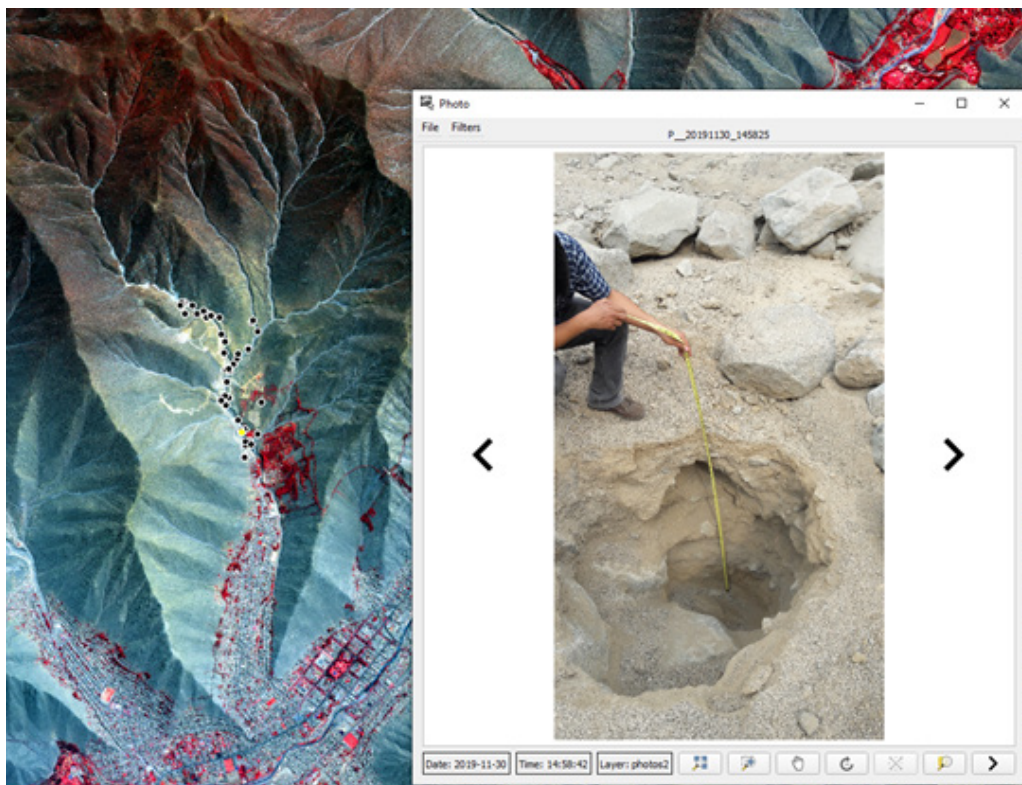


Figura 43. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P1.

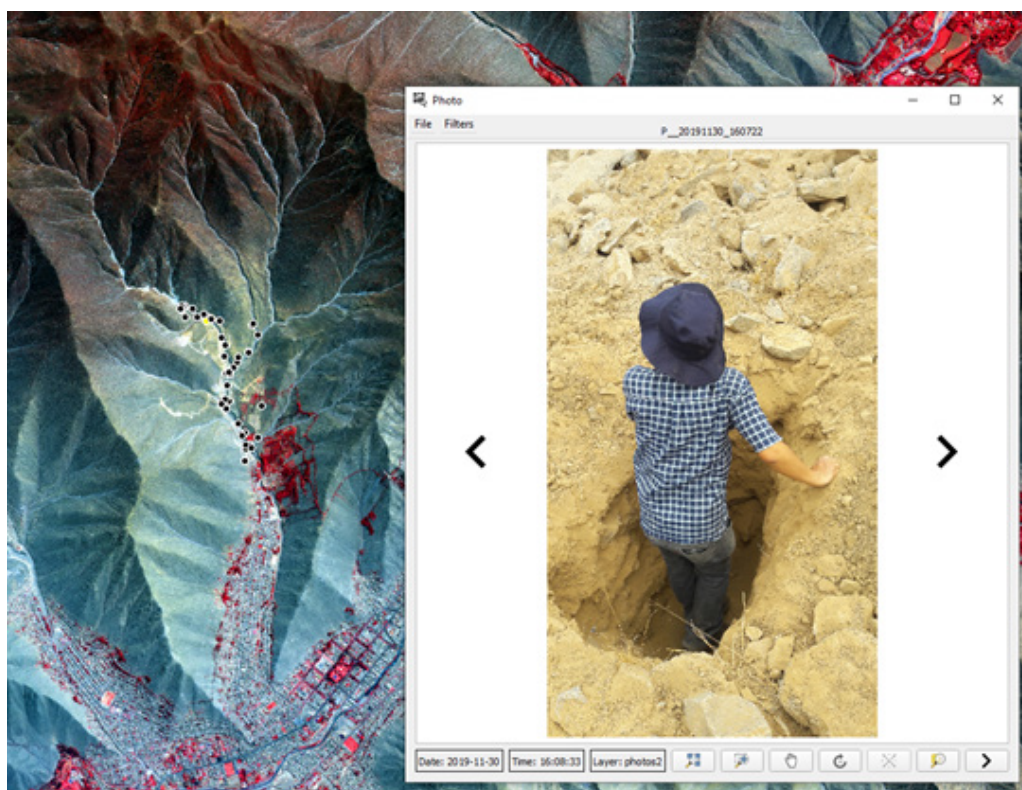


Figura 44. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P2.



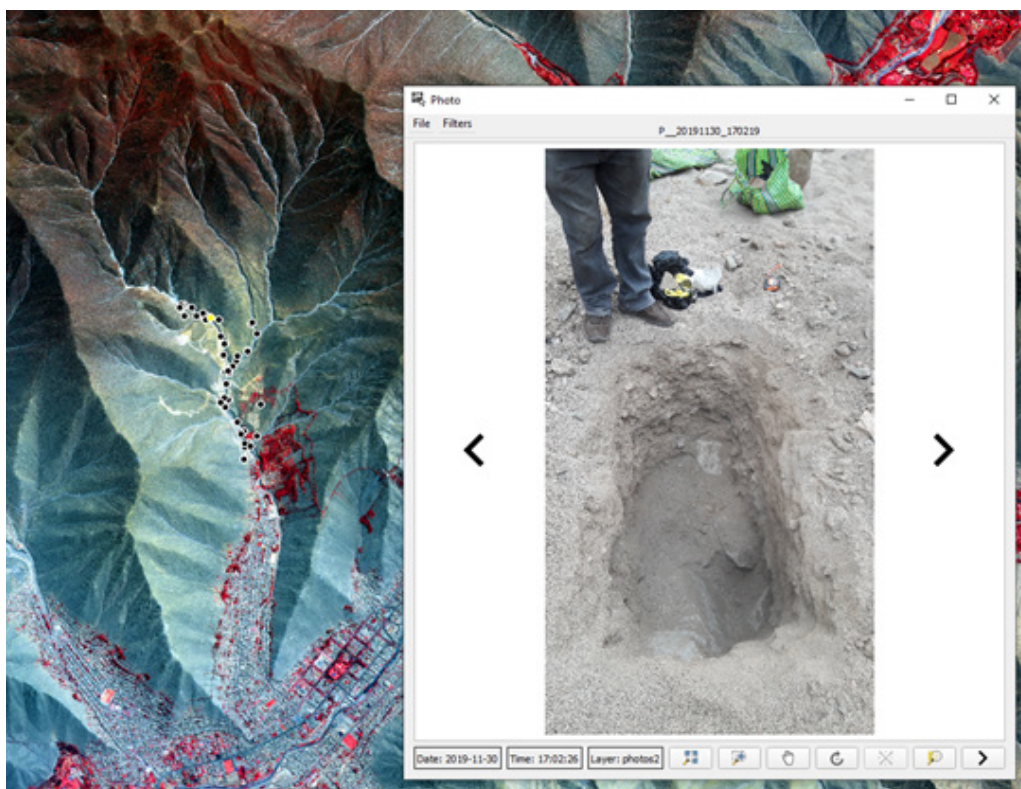


Figura 45. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P3.

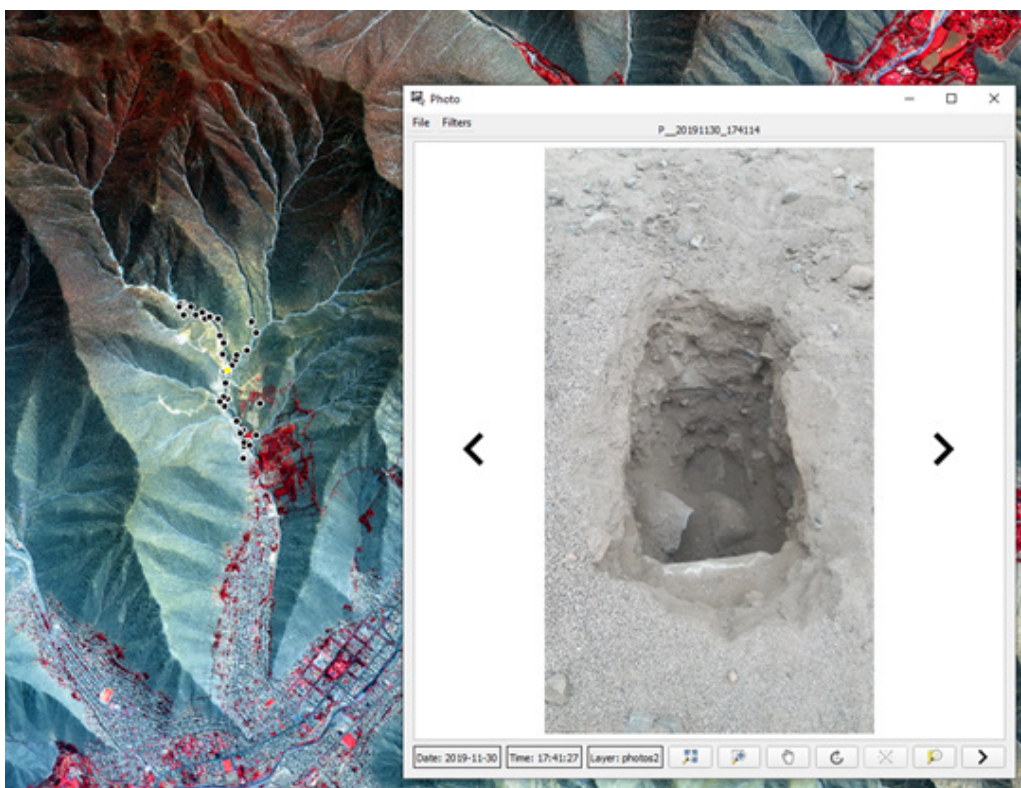


Figura 46. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P4.



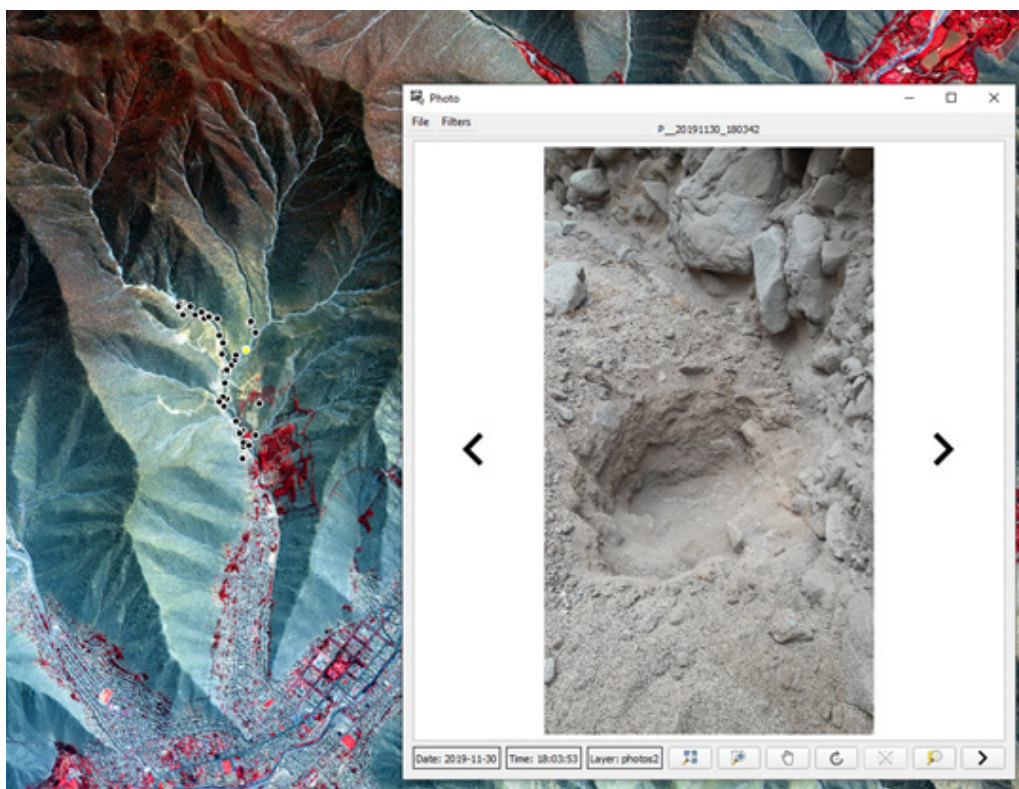


Figura 47. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Calicata P5.

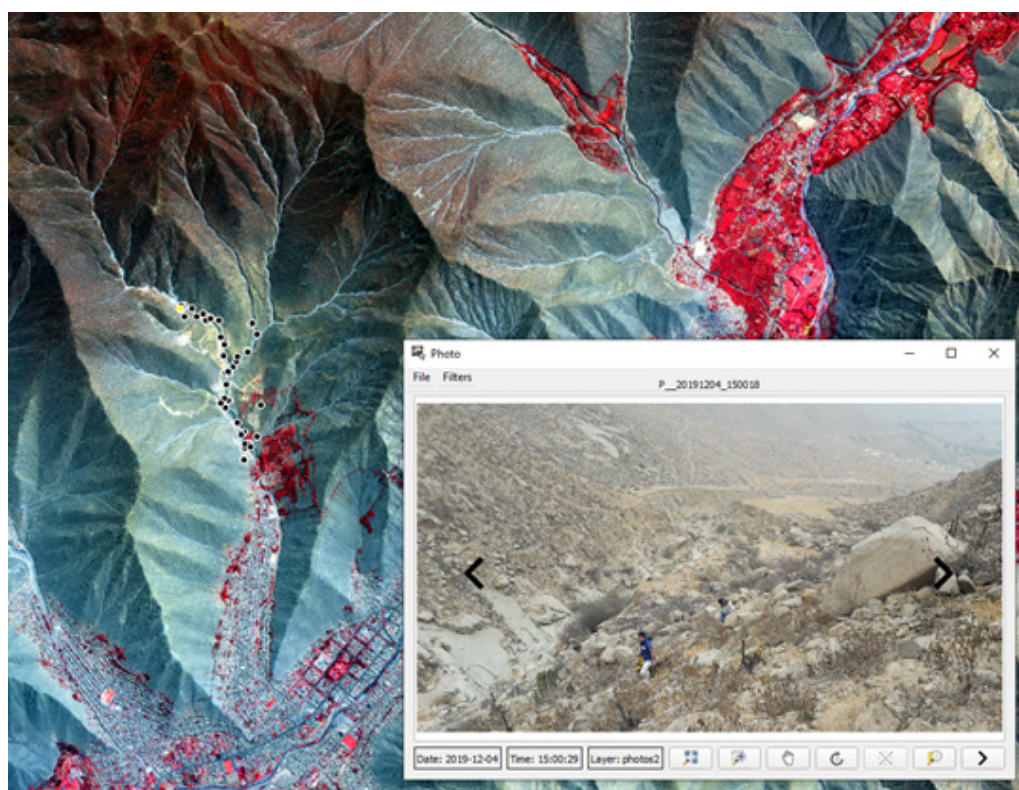


Figura 48. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Vistas aguas abajo.



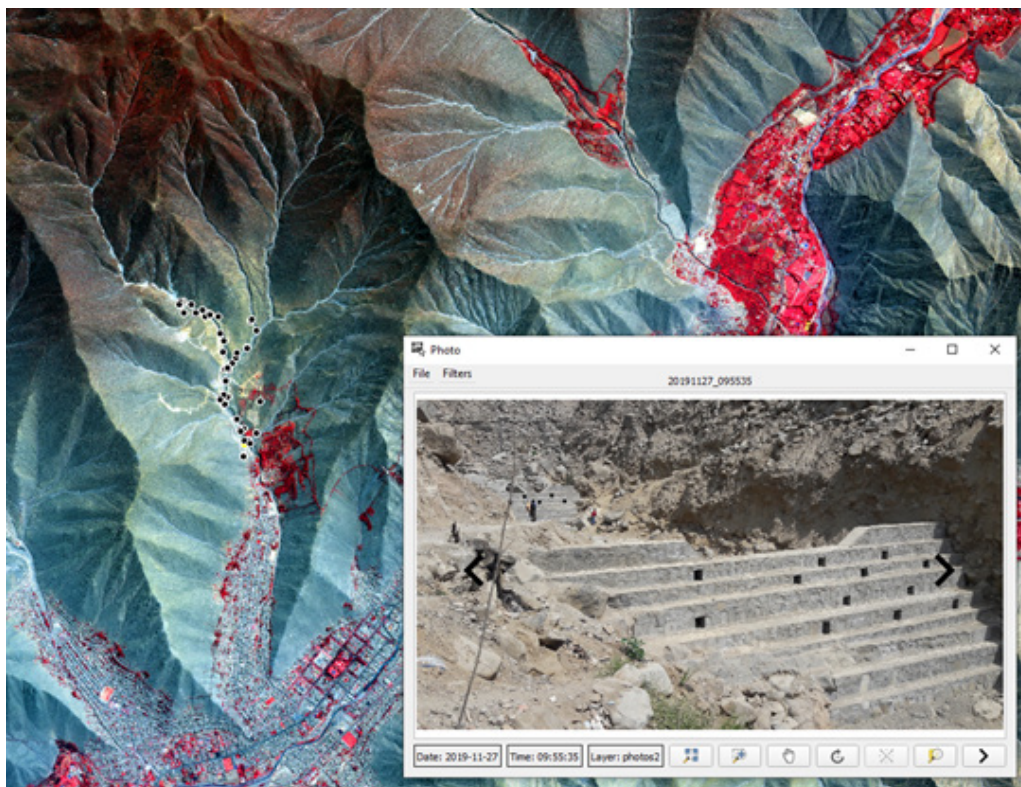


Figura 49. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Presas y geomalla para el control de sedimentos.

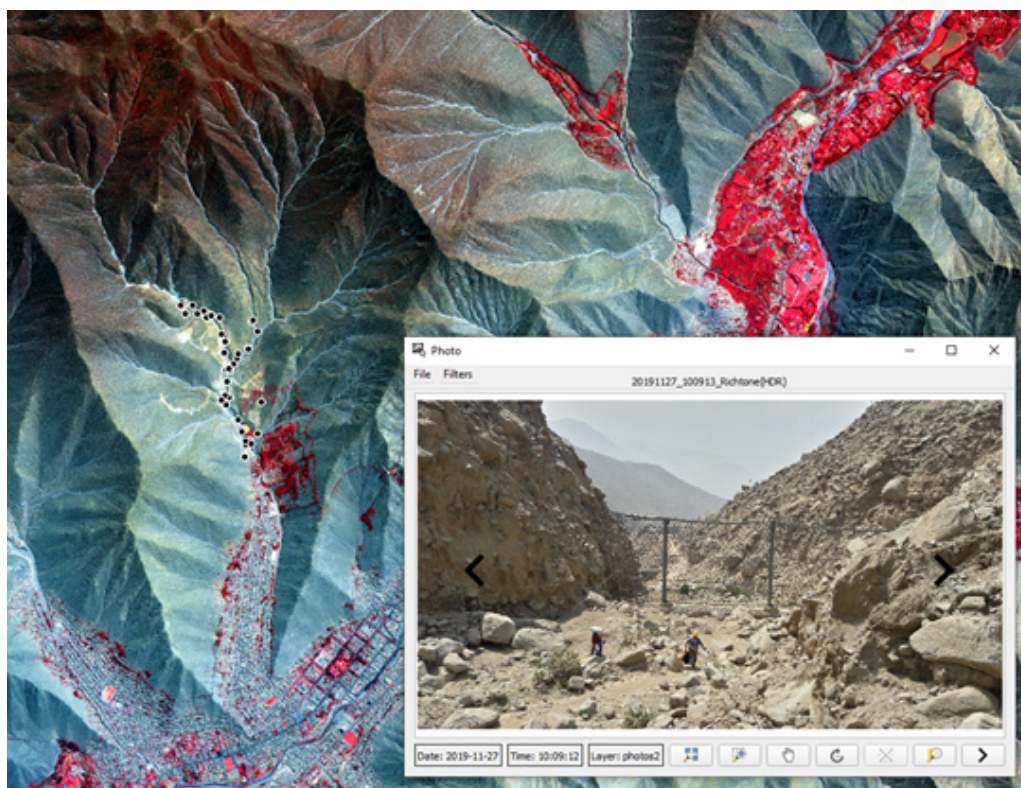


Figura 50. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Geomalla para el control de sedimentos.



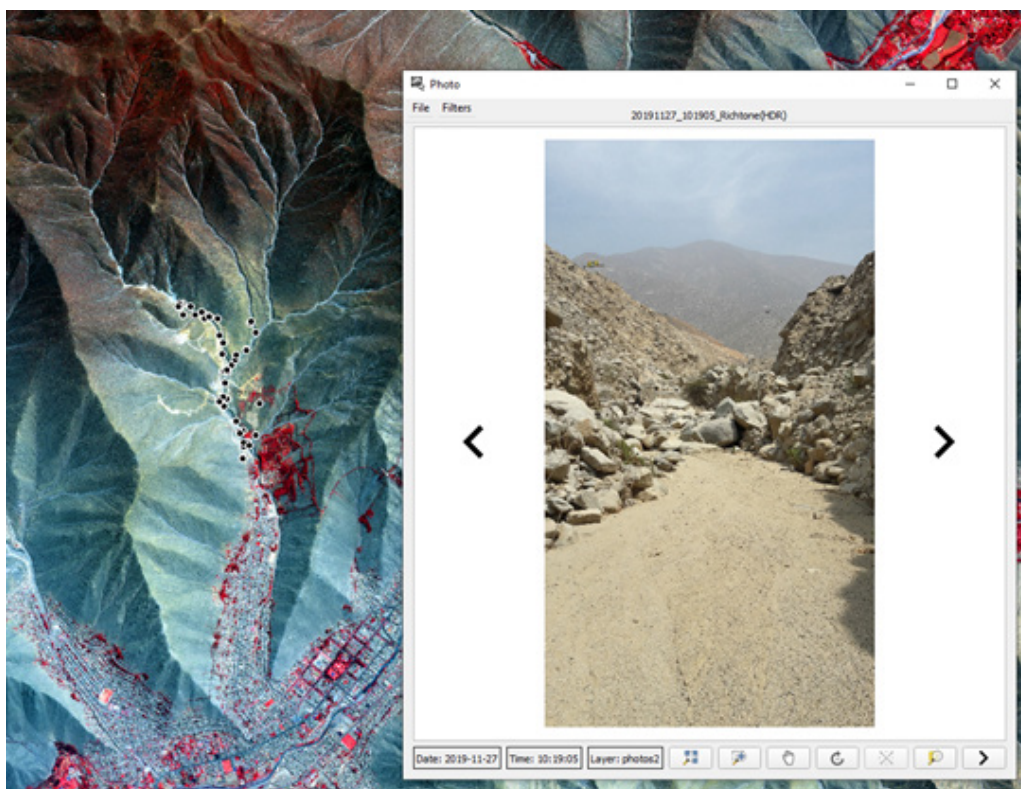


Figura 51. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Depósito aluvial.

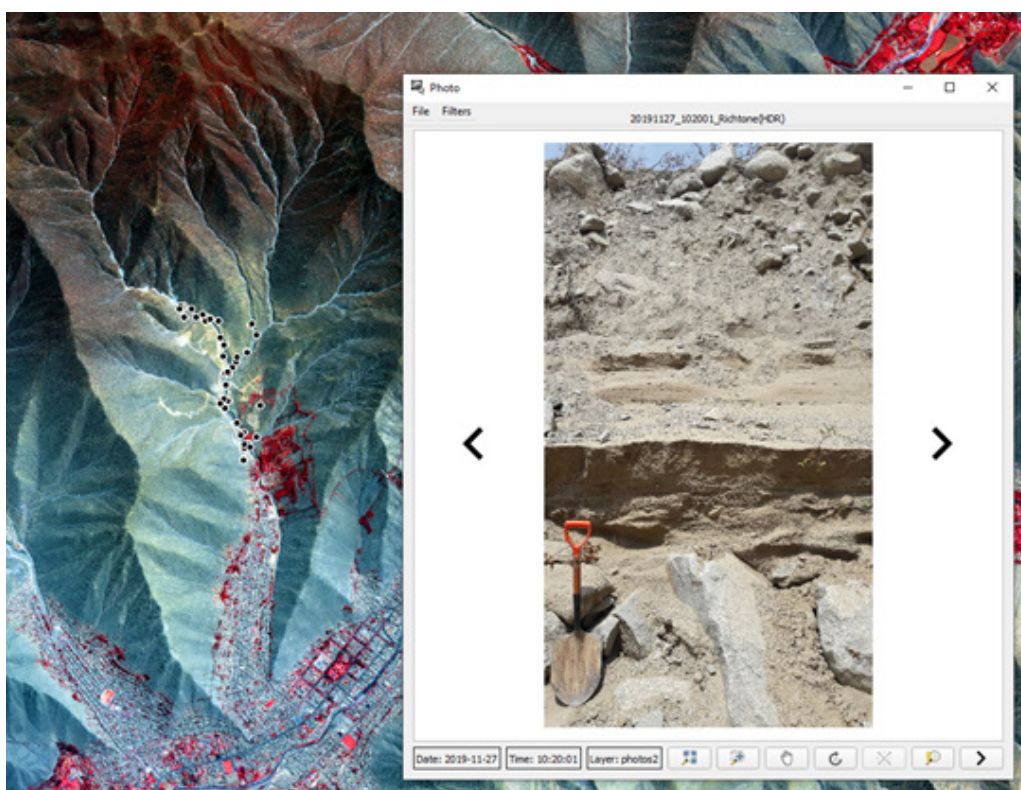


Figura 52. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos en el cauce.



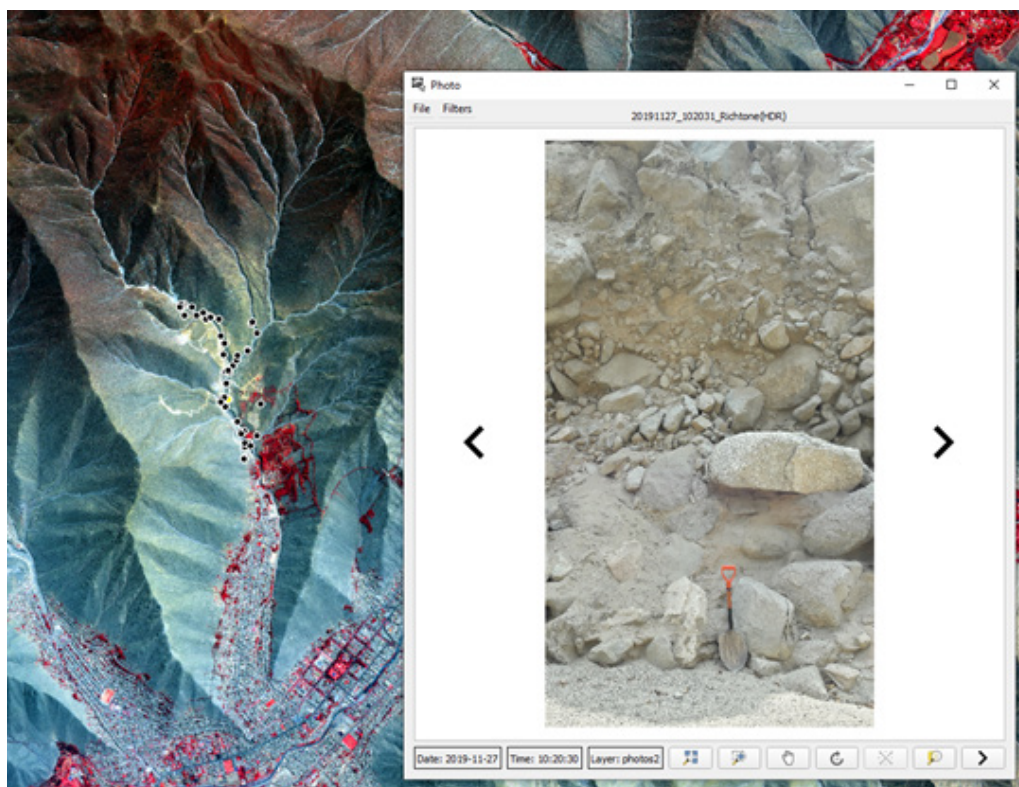


Figura 53. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos en el cauce.

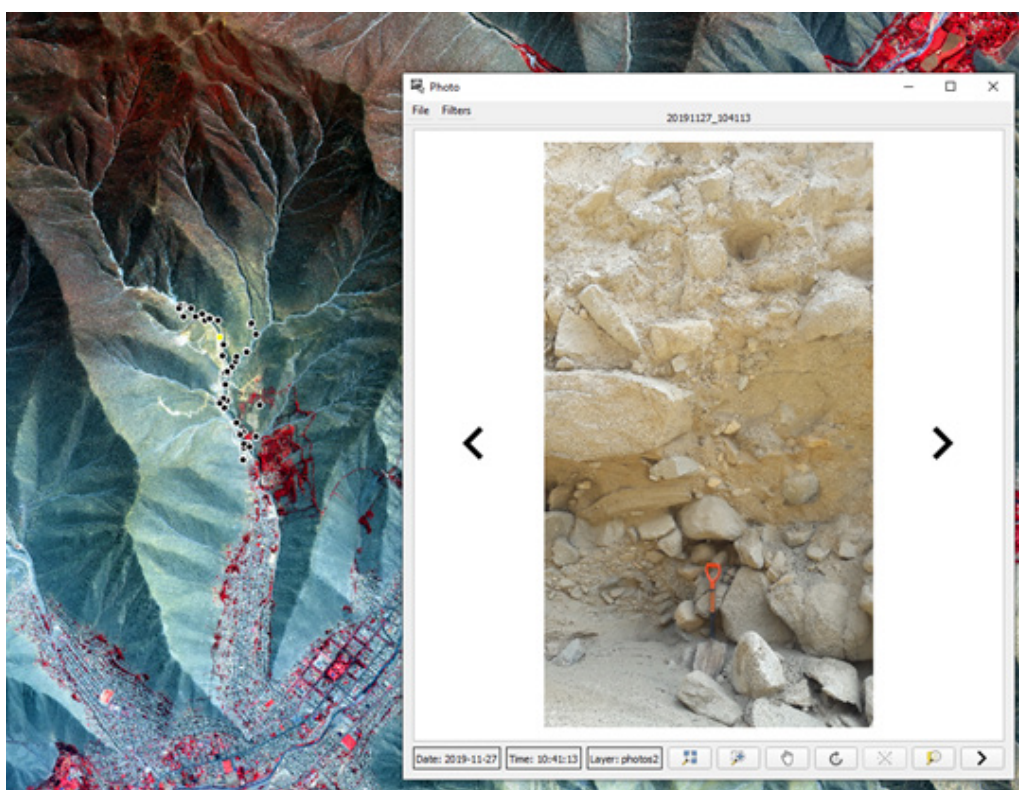


Figura 54. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Perfil de sedimentos en el cauce.

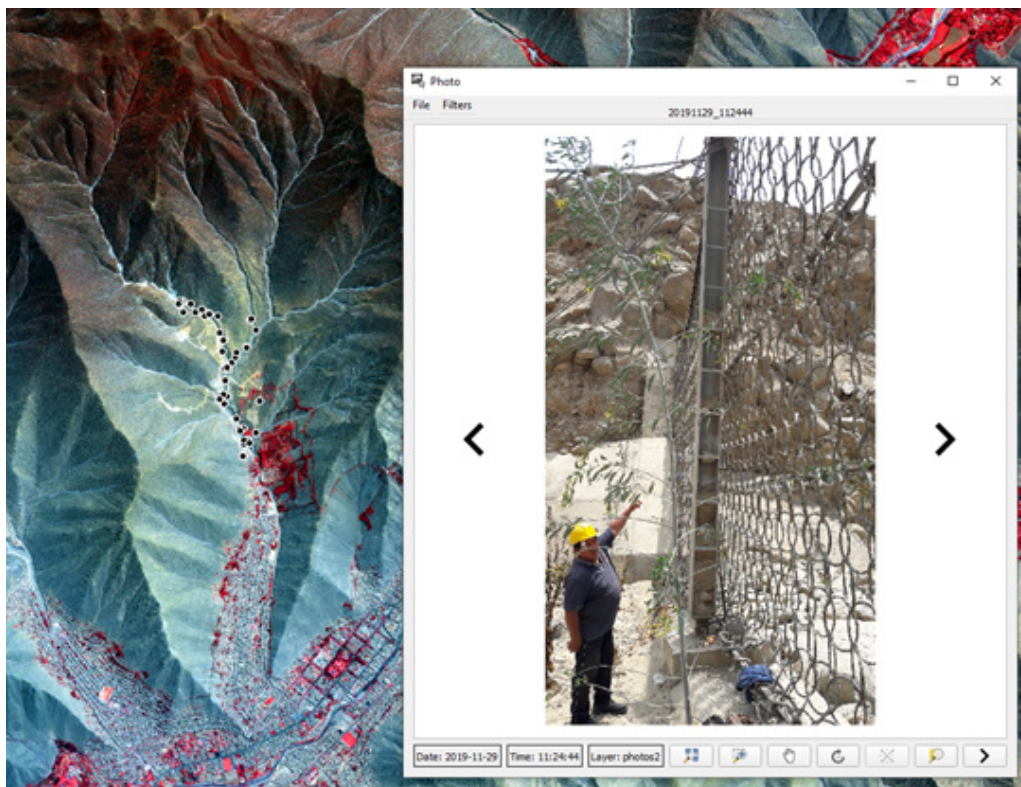


Figura 55. Microcuenca Pedregal. Imagen PeruSAT-1 en combinación RGB 432 para resaltar la cobertura vegetal. Huella del paso de una onda de flujo de escombros (~4m) en una geomalla.





***Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú***  
*Dirección General de Hidrología*



*Jr. Cahuide 785, Jesús María - Lima*



*Cen tral telefónica (511) 614-1414*



*[www.senamhi.gob.pe](http://www.senamhi.gob.pe)*